

БИБЛИОТЕКА ФИЗИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ИМ. А.Г. СТОЛЕТОВА  
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



**С.Б. Рыжиков, Ю.В. Рыжикова**

# КАК БЫЛА ПРОЛОЖЕНА ДОРОГА В МИР ЭЛЕКТРОНИКИ

МОСКВА



2020

---

**УДК 374**  
**ББК 72.3**  
**Р 93**

*Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В.* Как была проложена дорога в мир электроники. Учебное пособие.

М.: ООО «Делу время», 2021. – 236 с.

**Рецензенты:**

*Вятчанин С.П.*, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой колебаний, МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет;

*Шаронова Н.В.*, д.п.н., профессор, МПГУ, кафедра теории и методики обучения физике им. А.В. Пёрышкина.

В книге простым и понятным для школьников языком описано развитие электроники с древнейших времён до настоящего времени. Описываются история изобретения и принципы работы компьютеров, спутниковой навигации, мобильной связи, светодиодных ламп и многих других современных устройств. Особое внимание уделено личностям учёных, изобретателей, организаторам производств. В книге раскрывается вопрос, какие качества необходимы человеку для того, чтобы стать успешным исследователем и изобретателем. Проводится параллель между развитием личности и развитием науки. Книга будет интересна школьникам, школьным учителям и всем интересующимся электроникой.

ISBN 978-5-907420-95-3

© Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В., 2021  
© АНО «Физическое общество им. А.Г. Столетова»

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. От наблюдений – к экспериментам.....	6
Электроёмкость.....	17
Лейденские банки.....	21
«Живое электричество».....	24
Положительные и отрицательные заряды.....	26
Молниеотвод.....	28
Закон взаимодействия электрических зарядов.....	37
Глава 2. Случайны ли случайные открытия?.....	44
Глава 3. Майкл Фарадей: соединение электричества и магнетизма.....	61
Глава 4. Видение мира через магический кристалл гипотез.....	74
Электролиз.....	79
Батарейки.....	81
Аккумуляторы.....	84
Глава 5. Тернистый путь научно – технического прогресса: тупики и повороты.....	90
Глава 6. Связь без проводов.....	114
Глава 7. От идеи до внедрения.....	128
Принцип работы диода.....	138
Солнечные батареи.....	142
Транзистор.....	142
Глава 8. От миллиметров к нанометрам.....	145
Фотолиитография.....	156
Глава 9. Цифровая революция.....	165
ЦАП и АЦП.....	174
Сотовая связь.....	178
Цифровые фото-(видео) камеры.....	185
Жидкие кристаллы.....	187
Глава 10. Всё удобнее и удобнее.....	190
Сенсорный экран.....	193
Хранение информации.....	195
Лазерный диск.....	196
Flash-память.....	198
СВЧ-печь (микроволновка).....	201
Бесконтактные карты.....	207
GPS и ГЛОНАСС.....	211
Глава 11. Чудесные лампочки.....	217
Заключение.....	235

## ВВЕДЕНИЕ

*– Не представляю, как древние греки жили без компьютеров, телевизоров, телефонов...*

*– А никак, они же вымерли...*

*(из анекдота)*

Нас окружает бесчисленное множество электронных устройств: компьютеры, сотовые телефоны, спутниковые навигаторы, смарт-карты и др. Сегодня нам сложно представить свою жизнь без этих, несомненно, полезных, вещей. А ведь всего каких-то 150 лет назад не было не только всевозможных электронных устройств, но даже не было электрического освещения, электрочайников, электропоездов... Человечество за последние 150 лет сделало научных открытий и изобретений больше, чем за всю предыдущую историю! Но самое удивительное даже не то, какими большими шагами движется научно-технический прогресс, а то, насколько легко мы смирились с мыслью, что нас окружает техника, об устройстве которой мы зачастую не имеем никакого представления. Кто из читателей хотя бы примерно представляет устройство флеш-памяти или как узнаёт свои координаты компьютерная мышка, передвигаясь по белому листу бумаги? Возможно, многие даже спрашивали об этом своих родителей и учителей, но в ответ слышали только, что всё это очень сложно. Действительно современная техника очень сложна. Но, с другой стороны, её ведь сделали не инопланетяне, а люди, которые поначалу знали не больше, чем Вы.

А нужно ли знать, как устроена современная электроника? Ведь, чтобы играть в бесконечные компьютерные игры или «сидеть» в интернете совсем не обязательно знать, что там внутри. Достаточно включить – и успевай только нажимать нужные кнопки...

Авторы видят, по крайней мере, три причины, почему важно понимать основные принципы работы окружающей нас техники.

Во-первых, многие устройства таят в себе опасность, о которой мы даже не подозреваем. Знание принципов их работы позволяет минимизировать вредное воздействие техники на наш организм.

Во-вторых, мы становимся слишком зависимы от людей, которые эти электронные устройства продают или ремонтируют.

В-третьих, любознательность – это нормальное качество развивающейся личности, а её отсутствие говорит, что что-то не в порядке. Если в юности человек внушит себе, что его мозг способен только проходить бесчисленные уровни компьютерных игр, а всё остальное за пределами сложно, то вряд ли из него вырастет творческая личность.

Эта книга обращена именно к тем, кто «хочет всё знать». В ней в доступной для школьников форме описаны не только принципы работы современной электроники, но и показан путь, как люди пришли к изобретению того, без чего кажется невозможной наша цивилизация. В книге почти нет математических формул: для понимания принципов работы они не нужны. Многие технические подробности будут опущены. И не только потому, что они слишком сложны или содержат коммерческую тайну, а просто потому, что научно-технический прогресс движется очень быстро, и, если описывать конкретные детали устройств, то книга рискует устареть ещё до того, как будет издана. Задача книги – рассказать о принципах работы современных электронных устройств и о необходимых качествах исследователей, способных создавать новое.

## ГЛАВА 1. ОТ НАБЛЮДЕНИЙ – К ЭКСПЕРИМЕНТАМ

*Бросая в воду камешки, смотри на круги, ими образуемые: иначе такое бросание будет пустою забавой.*

*Козьма Прутков*

История науки прошлых веков – это история умения наблюдать. Многие вещи настолько привычны, что мы проходим мимо них, не обращая внимания, просто не замечая. Очень хорошо это описано в бессмертном произведении Артура Конан Дойля (*Arthur Conan Doyle*, 1859 – 1930) «Записки о Шерлоке Холмсе». Великий сыщик Шерлок Холмс постоянно говорил своему другу Уотсону, что тот смотрит, но не замечает. Классический пример невнимательности: однажды Холмс поймал своего друга на том, что он сотни раз поднимался по лестнице в прихожей, но никогда не обращал внимание сколько на ней ступенек. В рассказах часто незаметная на первый взгляд мелочь позволяла Холмсу раскрыть преступление.

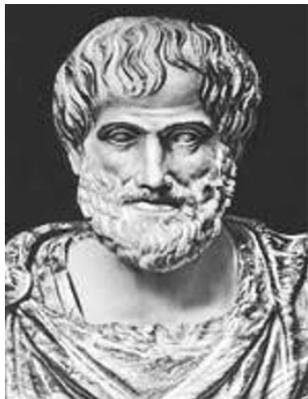
Мало кто знает, что прообразом литературного героя был преподаватель Конан Дойля в Эдинбургском университете – хирург Джозеф Белл (*Joseph Bell*, 1837 – 1911). Джозеф Белл учил своих студентов замечать любые мелочи. Конан Дойля (да и многих других) поражало, что при первом знакомстве с пациентом Джозеф Белл определял не только его болезнь, но профессию и характер больного. «Вы всё видите, но не даёте труда поразмыслить о том, что вы видите», говорил Джозеф Белл своим студентам. Конан Дойль считал, что ему очень повезло, что Джозеф Белл сделал его своим ассистентом, – это позволило ему постоянно изучать методы работы Джозефа Белла.

Разгадывать тайны природы не менее занятно, чем распутывать детективные истории, а наблюдательность нужна учёным не меньше, чем сыщикам. Люди видели проявления электричества и магнетизма с незапамятных времён, но никому не приходило в голову, что эти явления связаны между собой, разве что было общее соображение, что всё в мире взаимосвязано.

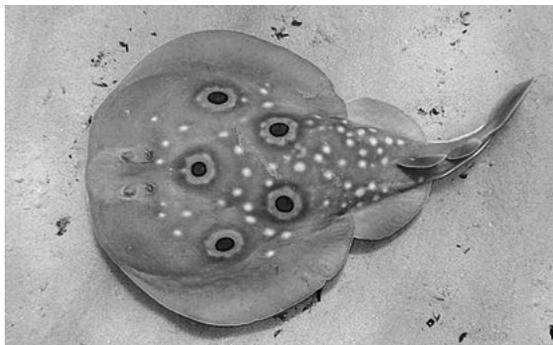
С древнейших времён люди видели во время грозы молнии. Моряки перед грозой на остриях мачт иногда наблюдали огни святого Эльма... Живущие на крайнем севере народы с незапамятных времён наблюда-

ли полярные сияния. Сегодня мы знаем, что полярные сияния вызваны потоком электрически заряженных частиц, отклоняющихся в магнитном поле Земли. Но народы севера видели в полярных сияниях проявление Высших сил и не пытались их научно объяснить.

Что ещё знали древние об электричестве? Сегодня мы знаем об электрических рыбах. Древние также знали о них. Аристотель (IV в. до н.э.) упоминает о рыбе в Средиземном море, которая заставляет цепенеть животных. Сейчас эта рыба называется электрический скат (рис. 1). Существует легенда, что страдавший подагрой римский император Тиберий (42 год до н. э. – 37 год н. э.), купался в море и наступил на электрического ската. В этом нет ничего удивительного, поскольку скаты ведут придонный образ жизни и могут частично зарываться в грунт. Удивительно было то, что боль в ногах уменьшилась. Конечно, император обратил внимание на чудесные свойства этой рыбы. Требовалось какое-то объяснение, и врачи решили, что рыба выделяет особый яд, который действует через кожу. Удивительно, но это объяснение всех устранивало до середины XVIII века.



*Аристотель (IV в. до н.э.)*



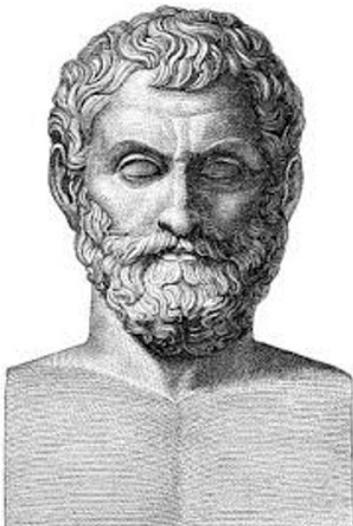
*Рис. 1. Электрический скат*



## ЭТО ИНТЕРЕСНО ОТКУДА ПРОИЗОШЛО НАЗВАНИЕ «ТОРПЕДА»?

Римляне назвали электрического ската «торпедой» (*torpedo*), от латинского *torpere* – оцепенение, поскольку эта рыба приводила к оцепенению касающихся её рук и ног. Когда в начале XIX века американский инженер Роберт Фултон (*Robert Fulton*, 1765 – 1815) создал подводные мины, он назвал их по имени грозного и таинственного подводного ската. Первые «самодвижущиеся» подводные мины изобрёл в 1865 году российский инженер Иван Фёдорович Александровский (1817 – 1894) и назвал их «самодвижущимся торпедо».

Ещё одно электрическое явление известно с давних пор – это электризация трением. Если расчёсывать кошку, то в темноте можно заметить небольшие искры. Особенно хорошо для наблюдений электризации трением подходил янтарь (сегодня электризацию трением можно наблюдать с помощью стекла и искусственных материалов, например, эбонита). Первые упоминания о свойствах янтаря восходят к древнегреческому мудрецу Фалесу Милетскому (Θαλῆς ὁ Μιλήσιος, по разным данным родился в 640 или 624 г. до н. э., умер 548 или 545 г. до н. э.). Существует легенда, что даже не сам Фалес, а его дочь заметила, что при натирании шерстью янтаря, к нему начинают прилипать маленькие ворсинки, которые потом отпадают. Вряд ли дочь Фалеса была первой увидевшей таинственное свойство янтаря – пряли все девушки, янтарь был хорошо известен в Греции. Но она, в отличие от многих других, не только увидела, но и *обратила на это внимание*. Фалес повторил эти опыты с шерстью и сделал ещё наблюдения: лёгкие пёрышки и соломинки притягивались с расстояния нескольких сантиметров, кроме того, при натирании он слышал лёгкое потрескивание. Фалес также



Фалес Милетский (VI в. до н.э.)

описал притяжение железных опилок куском железной (магнитной) руды. Но главное, что сделал Фалес – это обратил внимание учеников на эти свойства янтаря и магнита. Можно сказать, что он опубликовал результаты своих наблюдений, благодаря чему мы знаем о них спустя 27 столетий. Объяснения этих явлений Фалеса вряд ли кого-то сегодня удовлетворит: он решил, что поскольку янтарь и магнит вызывают движение, то у них есть душа.



Рис. 2. Янтарь

Янтарь по-древнегречески – электрон (ἤλεκτρον). От камня, обладающего удивительными свойствами (рис. 2), и происходит название науки «электричество».

Происхождение терминов «магнит», «магнетизм» не вполне ясно. Древнеримский поэт Тит Лукреций Кар (*Titus Lucretius Carus*, около 99 – 55 до н. э) современник (и близкий друг) Юлия Цезаря, в своей бессмертной поэме «О природе вещей» (*De rerum natura*) написал:

*Может железо к себе притягивать камень, который  
Греки «магнитом» зовут по названию месторождения,  
Ибо находится он в пределах отчизны магнетов...*

Скорее всего, Лукреций говорит о провинции Магнесия (*Μαγνησία*) на восточном побережье Греции, где добывали чёрного цвета минерал магнетит (оксид железа). Заметим, что там же добывали белую магнезию (карбонат магния), которая дала название химическому элементу магнию. В свою очередь, Магнесия обязана своим именем первому царю Магнету, по легенде, сыну Зевса и нимфы Фии.

Столетием позже римский писатель Плиний Старший (23 – 79 г. н.э., погиб при извержении Везувия) приводит легенду о пастухе, который прилип к горе в подкованных железом сандалиях у города Магnez.

Надо заметить, что Фалес знал только о притяжении магнитом железа. В действительности магниты способны и притягиваться, и отталкиваться. Но это заметили позже. Впервые о способности магнитов отталкиваться упоминает Лукреций Кар через 500 лет после Фалеса.



*Тит Лукреций Кар*  
(99 – 55 до н. э)

Притягивающие способности янтаря большого практического значения не имели – разве только некоторые врачи пытались использовать его для лечения болезней. Магнитам сразу нашли применение: их использовали в мореплавании в качестве компаса. Правда, не в Европе, а в Китае, где компас использовали ещё за сотни лет до н.э. (рис. 3). В Европе первое письменное упоминание о компасе появляется в 1187 году. Его описал английский монах – августинец Александр Неккам (*Alexander Neckam*, 1157 – 1217), который через тысячу лет после Лукреция Кара в 1187 году написал поэму под тем же названием: «О природе вещей» (*De naturis rerum*). Компас того времени – это магнитная стрелка, укреплённая на пробке

и плавающая в воде.

Удивительно, что европейцы, узнав о магнитах, тысячелетие не замечали, что магнитная стрелка (стержень) отклоняется на север. Впрочем, не исключено, что возможность применять магниты для мореплавания была известна, но хранилась в тайне.



*Рис. 3. Компас, Китай, III в. до н.э.*

Измерения со временем становились всё более точными. Мореплаватели стали замечать, что стрелка компаса указывает не точно на север. Угол между направлением на север, который определяется по положению полярной звезды, и направлением стрелки компаса называют *магнитным склонением*. Кроме того, было замечено, что магнитная стрелка не располагается горизонтально. Указывающий на север конец стрелки в северном полушарии отклоняется вниз, в южном – вверх. Угол между горизонтом и направлением магнитной стрелки называют *магнитным наклоением* (не путать с магнитным склонением). Христофор Колумб (1451 – 1506) во время своего путешествия 1492 года через Атлантический океан обнаружил, что магнитные склонение и наклонение не постоянны. Это привело к необходимости создания карты магнитных склонений.

Может показаться удивительным, но знание двух фактов: магниты притягиваются и свободно подвешенная (или плавающая) магнитная стрелка ориентируется почти на север – юг, не приводило к теперь уже очевидно-му выводу, что Земля является огромным магнитом.

1600-ый год не только «круглая дата» в истории человечества, но и знаменательная веха в науке. Инквизиция в Риме сжигает философа – просветителя Джордано Бруно (1548 – 1600). Но развитие науки не останавливается. В этом же году выходит фундаментальный труд английского физика Вильгельма Гильберта (*William Gilbert*, 1544 – 1603), врача королевы Елизаветы и Иакова I. Название его книги (*De magneto magneticisque corporibus et de magno magnete tellure*) с латыни можно перевести: как «О магните, магнитных телах и большом магните – Земле».

В отличие от своих предшественников, Гильберт не только наблюдал, но *создавал гипотезы* и ставил эксперименты для проверки гипотез. В своей книге он не только обобщил сделанные до него разрозненные наблюдения, но привёл около 600 (!) своих опытов. Гильберт установил, что каждый магнит имеет два полюса, одноимённые полюса отталкиваются, а разноимённые – притягивают-



Вильгельм Гильберт,  
1544 – 1603

ся, и пришёл к выводу, что наблюдаемыеклонения и наклонения компаса можно объяснить, если принять, что Земля – это большой магнит. Для подтверждения своей гипотезы Гильберт создал небольшой железный шар – маленькую Землю и показал, что стрелка компаса принимает такие же положения, как и у поверхности Земли.



*Вильгельм Гильберт демонстрирует магнит королеве Елизавете I в 1598 году, картина Эрнеста Борда (1877 - 1934).*

В своей книге Вильгельм Гильберт уделил внимание и электричеству. Он впервые ввёл термин «электричество» (от греческого названия янтаря). До Гильберта особые способности притягивать мелкие предметы знали только у янтаря. Гильберт обнаружил, что при трении электрические свойства приобретают многие вещества: алмаз, аметист, стекло, сера и др. Для обнаружения электрических свойств веществ Гильберт изобрёл электроскоп («версор»), металлическую немагнитную стрелку на острие (рис. 4). При поднесении заряженного предмета сбоку от конца стрелки, стрелка разворачивается к заряженному предмету. Принцип работы «версора» мы разберём позже (почувствуйте себя пока на месте Гильберта).



*Рис. 4. «Версор» Вильгельма Гильберта*

Вильгельм Гильберт разделил наэлектризованные вещества на два вида

электричества. Один вид он назвал «смолистое» электричество (современное название – отрицательные заряды), которое получается при трении янтаря о мех, и «стеклянное» (положительные заряды), получаемое при трении стеклянной палочки о шёлк. С помощью своего электроскопа Гильберт обнаружил, что тела с разными видами электричества притягиваются, но про отталкивание он ещё не знал. Отталкивание одноимённых электрических тел впервые наблюдал через 30 лет в Ферраре итальянский астроном и богослов Никколо Кабео (*Niccolo Cabeo*, 1586–1650).

У Гильберта не было даже мысли о связи электричества и магнетизма. Магнетизм он считал особым свойством тел, присущим им от природы, а электричество – проявлением трения.

Возможно, покажется странным, что люди не замечали явлений, которые сегодня может воспроизвести любой школьник. Но стоит вспомнить, что в те времена проявления электрических и магнитных явлений были очень слабыми. Тогда не умели намагничивать железные стержни и пользовались только слабыми природными магнитами, стрелки у компасов были намагничены гораздо слабее современных компасов, и двигались еле-еле. Более того, было замечено, что природные магниты со временем теряют силу. Правда Гильберт обнаружил, что железные предметы под влиянием магнита сами приобретают магнитные свойства. Стержень можно намагнитить и от Земли. Если положить железный стержень в направлении «север-юг» и постучать по нему, то он слегка намагнитится (рис. 5). Можете сами попробовать намагнитить так железный гвоздь. Эффект будет слабый, его можно заметить разве что по воздействию гвоздя на компас. Ещё Гильберт открыл, что при сильном нагревании магнит размагничивается, сегодня мы называем температуру размагничивания точкой Кюри в честь французского физика Пьера Кюри (*Pierre Curie*, 1859 – 1906). Точка Кюри зависит от материала, у магнетита ( $Fe_3O_4$ ) она равна примерно 580°C.

Невозможность управлять силой магнита ограничивало исследователей. Воспроизводить эксперименты было очень сложно. Например, Гильберт обнаружил, что у каждого магнита два полюса, причём, если разделить магнит надвое, то у каждого куска магнита будет два полюса. Казалось бы, что тут сложного? Но даже столетие спустя английский астроном Эдмунд Галлей (*Edmond Halley*, 1656 – 1742), кстати сказать современник и близкий друг Исаака Ньютона (*Isaac Newton*, 1643 – 1727), предпринял три плавания (1698–1702) в Атлантическом океане для проверки своей

гипотезы, что Земля имеет 4 магнитных полюса! Хотя его гипотеза оказалась неверной, тем не менее он принёс заметную пользу науке – составил первую подробную карту магнитных склонений.



*Рис. 5. Намагничивание железа при ковке  
(из книги Вильгельма Гильберта).*

К сложностям наблюдений явлений электричества и магнетизма добавлялось полное отсутствие теории. Лукреций Кар считал, что магниты испускают мельчайшие невидимые глазу частицы, которые вытесняют воздух между телами, между ними образуется пустота, и в результате они притягиваются. Французский физик и математик Рене Декарт (латинское имя *Renatus Cartesius*, 1596 – 1650) приписывал магнитные свойства вращающемуся вихрю флюидов, которые втекают в один полюс и вытекают из другого... К сожалению, процессы в магнитах очень сложны, и их смогли описать только в XX веке на основе квантовой механики. Что же касается механизма электризации трением, то точной количественной теории нет до сих пор!

Сегодня мы знаем, что изменение заряда в металлах и других твёрдых телах обусловлено перемещением элементарных частиц – *электронов*. Электроны входят в состав каждого атома и имеют отрицательный заряд. Если у тела отнять электроны, оно становится заряжено положительно, а если добавить – отрицательно. Заряд одного электрона очень мал, но их число велико. Чтобы тело начало проявлять электрические свойства,

нужно у него отнять (или добавить) ничтожную часть электронов. Чтобы понять насколько ничтожна эта часть, можно сделать такое сопоставление. Число электронов, приобретаемое куском янтаря при трении о мех, относится к общему числу электронов у янтаря, как количество воды в ведре относится к количеству воды в Каспийском море.

При электризации трением происходит переход электронов с одного тела на другое, но непонятно какую именно роль играет трение, какие силы «отрывают» электроны у стекла и почему затем электроны со временем возвращаются обратно. Существуют данные, что определённую роль играют молекулы воды в месте соприкосновения тел (молекулы воды присутствуют даже на телах, которые мы считаем сухими), но строго описать все взаимодействия пока не удаётся.

После Вильгельма Гильберта в течении 200 лет (!) в магнетизме не было сделано новых важных наблюдений. Дальнейшее развитие науки о магнетизме произойдёт только после открытия магнитных свойств электрического тока в 1820 году, что будет рассмотрено ниже.

Несмотря на отсутствие новых научных наблюдений в XVII веке для нужд мореплавания была проделана большая кропотливая работа: были составлены карты магнитных склонений. Здесь было сделано интересное наблюдение: оказалось, что со временем углы магнитных склонений немного меняются. Сейчас мы знаем, что магнитные полюса Земли медленно дрейфуют, но ввиду труднодоступности арктических широт магнитный полюс в северном полушарии был достигнут английским полярным исследователем Джеймсом Россом (*James Clark Ross*, 1800 – 1862) в Канадском архипелаге в 1831 году, а к магнитному полюсу в южном полушарии только в 1909 году добралась экспедиция под командованием англо-ирландского исследователя Антарктики Эрнеста Шеклтона (*Ernest Shackleton*, 1874 – 1922).

Наблюдения далеко не всегда приводят к правильным гипотезам, но они, несомненно, являются движущей силой генерации идей. 17 марта 1716 года мощное северное сияние наблюдалось не только в полярных широтах, но и в Германии, Франции, Англии, Голландии... О полярных сияниях знали давно и объясняли это явление отражением в небе свечения полярных льдов, своего рода миражами. Наблюдение сияния так далеко от полярных льдов требовало нового объяснения. Были выдвинуты разные объяснения, например, что из Земли в районе полюса истекают горючие газы. Только Эдмонд Галлей обратил внимание, что дуги сияния направлены не точно



*Михаил Васильевич Ломоносов  
(1711 – 1765)*



*Отто фон Герике  
(1602 – 1686)*

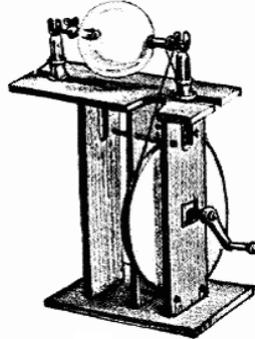
на север, а совпадают с направлением стрелки компаса. Не зная об электрической природе светящихся частиц, Галлей предположил, что вырывающиеся из Земли светящиеся вещество под действием магнита – Земли устремляется от северного полюса к южному.

Великий российский учёный Михаил Васильевич Ломоносов (1711 – 1765), живя в Архангельске, часто наблюдал полярные сияния и даже выдвинул гипотезу об их электрической природе, но в те времена проверить эту гипотезу было невозможно.

Для исследования электрических явлений нужно было делать электризацию более заметной. Немецкий физик Отто фон Герике (*Otto von Guericke*, 1602 – 1686) упоминается в школьном учебнике физики, как изобретатель вакуумного насоса и создатель магдебургских полушарий (1654). Он занимался также опытами с электричеством и придумал для электризации трением вращать небольшой шар из серы, который он натирал своей рукой. Герике повторил опыты предшественников, но сам особо значимых наблюдений в области электричества не сделал. Английский физик *Фрэнсис Хоксби (Francis Hauksbee*, 1666 – 1713) в 1706 году сделал электрическую машину, похожую на машину Герике, только шар из серы он заменил на полый стеклянный шар (рис. 6). Хоксби получал искры длиной в дюйм (2,4 см).



*Фрэнсис Хоксби  
(1666 – 1713)*



*Рис. 6. Электрическая  
машина Хоксби*

Сегодня мы знаем, что пробой в воздухе в зависимости от влажности наступает при напряжённости поля от 10 до 30 киловольт на сантиметр. Например, между отверстиями в электрической розетке расстояние 2 см. Следовательно, чтобы между ними проскочила искра, нужно, чтобы напряжение было в 20 киловольт, т.е. в почти 100 раз больше обычных 220 вольт. Если Хоксби получал искры 2,4 см, то его машина создавала напряжение не менее 24 киловольт.

## ЭЛЕКТРОЁМКОСТЬ

Возникает вопрос: почему столь большие напряжения не убили Хоксби, ведь напряжение в розетке 220 вольт опасно для жизни? А тем более киловольты!

Дело в том, что, хотя напряжения в электрической машине достигались большие, накапливаемые заряды очень малы и поэтому ток разряда совсем небольшой, возможно, микроамперы. Такой ток может вызвать покалывание, но не сильную боль, а тем более смерть. Когда мы причёсываем сухие волосы пластмассовой расчёской (у себя или у кошки) можно слышать потрескивание, а в темноте даже увидеть искры, значит мы создаём большие напряжения – киловольты! Но ток мал, и эти искры не вызывают боли.

Какой же максимальный заряд может накопить электрическая машина? Это зависит от электроёмкости (далее будем говорить просто ёмкость) электризуемого тела. Поскольку ёмкость будет играть существенную роль в дальнейшем изложении, рассмотрим этот вопрос подробнее, пользуясь современной терминологией.

Пусть у нас есть электрическая машина с вращающимся «смоляным» (янтарным) шаром, который трётся о шёлк. Назовём его  $R$  (*Rotor*). Будем заряжать от него какой-нибудь предмет. Возьмём для простоты металлический шар ( $M$ ) и соединим его с  $R$  небольшой проволочкой, как показано на рис. 7. При вращении шара произойдёт электризация трением: отрицательно заряженные электроны ( $e$ ) будут переходить от шёлкового (*silk*) платка ( $S$ ) на шар  $R$ , в результате шар  $R$  зарядится отрицательно (избыток электронов), а шёлковый платок  $S$  – положительно (недостаток электронов). Далее избыток электронов с шара  $R$  будет по проволоке переходить на  $M$ . Первый электрон пройдёт практически без усилий. Но по мере того, как на  $M$  будут накапливаться электроны ( $M$  приобретёт отрицательный заряд), они будут отталкивать новые электроны, не пуская их на  $M$ . Сколько электронов, т.е. какой заряд сможет перейти на  $M$ ?

Когда мы вращаем шар  $R$ , мы совершаем работу. Эта работа идёт на электризацию, т.е. на перенос электронов с  $S$  на  $R$ . Точнее, на перенос электронов уходит только часть нашей работы по вращению шара, а часть превращается в тепло. Шар  $M$  сможет заряжаться пока наша работа по переносу электрона с  $S$  на  $R$  будет больше работы электрического поля шара  $M$ , препятствующей перемещению этого электрона от  $R$  до  $M$ . Работа электрического поля равна произведению силы со стороны заряда  $M$  на путь, проходимый электроном. Чем больше путь проходят электроны и чем сильнее заряд у  $M$ , тем больше совершает работу электрическое поле шара  $M$ . Значит, чтобы поместить больше зарядов на  $M$  нам нужно уменьшить силу со стороны шара  $M$  и уменьшить путь, который нужно пройти электронам.

Уменьшить силу со стороны шара  $M$  можно увеличив его радиус. Дело в том, что сила, с которой  $M$  отталкивает вновь поступающие электроны, пропорциональна плотности заряда на  $M$  (рис. 8), т.е. чем больше шар, тем легче электронам до него добираться, тем больший заряд на него можно поместить. Иначе говоря, чем больше шар, тем больше его ёмкость.

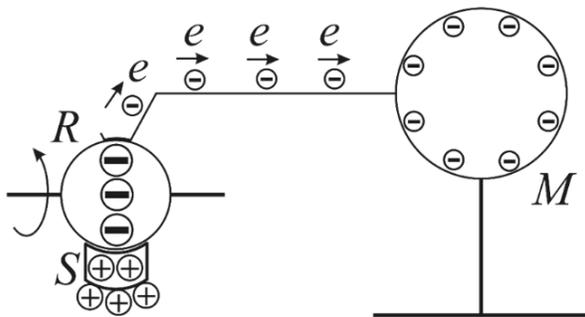


Рис. 7. Заряд шара от электрической машины

Кроме того, нужно учесть, что при вращении шара на  $S$  будет накапливаться положительный заряд, который будет удерживать электроны, мешая заряжать  $M$  (рис. 7). Последнюю проблему можно решить, меняя время от времени шёлковый платок  $S$  или снимая с него заряд с помощью провода, подсоединённого к удалённому металлическому предмету (заземление).

Можно ли сократить путь, проходимый электронами? Если мы прислоним  $M$  к  $R$ , это не спасёт положение, поскольку силы отталкивания заставят электроны скапливаться с другой стороны шара  $M$  (сторона обозначена буквой  $N$  на рис. 9), и им придётся перемещаться по  $M$ .

Работу по переносу заряда можно уменьшить если окружить  $M$  пустотелой сферой  $T$ , как показано на рис. 10. В  $T$  сделаем маленькую дырочку (обозначена буквой  $A$  на рис. 10), чтобы через неё можно было провести проводок, соединяющий  $M$  и  $R$ .

Соединим  $T$  с  $S$ . Теперь при трении электроны от  $S$  будут поступать на  $R$ ,  $R$  будет передавать избыток электронов на  $M$ , а  $S$  будет компенсировать недостаток электронов, забирая их с  $T$ . Таким образом, на  $M$  будет накапливаться отрицательный заряд, а на  $T$  — практически такой же положительный заряд. Суммарный заряд на  $M$  и  $T$  будет равен нулю, то есть за пределами сферы суммарное действие электрического поля шара  $M$  и сферы  $T$  будет нулевым. Электрические силы будут ощущаться только в промежутке  $AB$ . Поэтому на передвижение электронов от сферы  $T$  до  $S$  и от  $R$  до точки  $A$  не будет затрачиваться никакой работы, а работа электрического поля  $M$  против перемещения электронов будет совершаться толь-

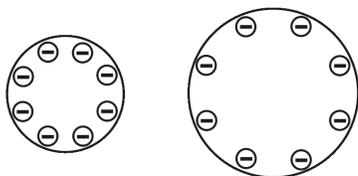


Рис. 8. При одном и том же заряде плотность заряда на большом шаре меньше.

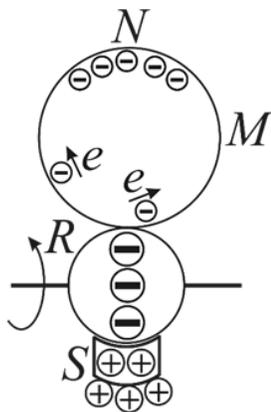


Рис. 9. Заряды на шаре  $M$  будут удаляться от электрической машины.

ко на участке  $AB$ . Чем меньше зазор  $AB$ , тем меньше работа электрического поля  $M$ , тем больше заряд мы сможем разместить на  $M$ .

Мы построили конденсатор. Ёмкость конденсатора определяется как отношение заряда к напряжению между обкладками ( $T$  и  $M$ ). Чем меньше зазор между обкладками, тем больше заряд может принять конденсатор, то есть, тем больше его ёмкость.

Насколько малым можно сделать зазор? Если зазор будет очень мал, а напряжение велико, то произойдёт пробой воздуха. Чтобы пробоя не было между обкладками помещают стекло, или другой изолятор.

Тогда зазор можно сделать микронным, создавая при этом большую ёмкость.

Все наши рассуждения можно повторить не со смоляным, а со стеклянным шаром, тогда на внешней обкладке будет скапливаться отрицательный заряд, а на внутренней – положительный.

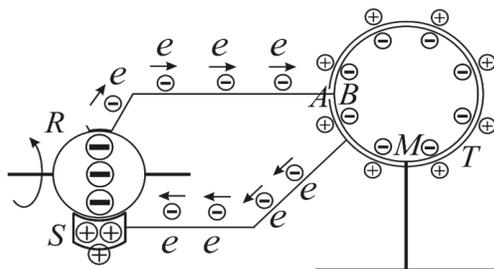


Рис. 10. Принцип устройства конденсатора

На практике конденсаторы делают не сферическими, а цилиндрическими или плоскими, как показано на рис. 11, но суть остаётся прежней – суммарный заряд обкладок равен нулю и за пределами обкладок электрического поля практически нет. Чтобы ёмкость была больше, площадь обкладок стараются сделать как можно больше. В 1931 году американский инженер Юлий Эдгар Лилиенфельд (1882 – 1963, родился во Львове) предложил в качестве изолятора использовать тончайшую оксидную плёнку металла, а в качестве одной из обкладок использовать густую жидкость – электролит. Создавать оксидный слой оказалось намного проще, чем делать тончайшие стеклянные пластины. Электролитические конденсаторы широко используют сейчас в технике.



*Рис. 11. Конденсаторы*

Разумеется, в начале XVIII века, когда никто не знал об электронах и не было ещё точных представлений о различии смоляного и стеклянного электричества, конденсаторы можно было открыть только случайно.

## ЛЕЙДЕНСКИЕ БАНКИ

Первыми конденсаторами стали лейденские банки, названные по имени города Лейден, где они были изготовлены. От описанной конструкции на рис. 10 лейденские банки отличаются тем, что имеют не сферическую, а цилиндрическую форму. На рис. 12 показан современный вид лейденской банки, используемый для демонстрационных экспериментов в школе (общий вид и в разрезе). Между двух тонких металлических обкладок (1) и (2) помещается высокий стеклянный стакан (3). Для удобства заряда и разряда к внутренней обкладке (2) присоединяется металлический стержень с шаром на конце (4) (с помощью металлических контактов (5)). Получается конденсатор с двумя обкладками и стеклянным изолятором между ними.

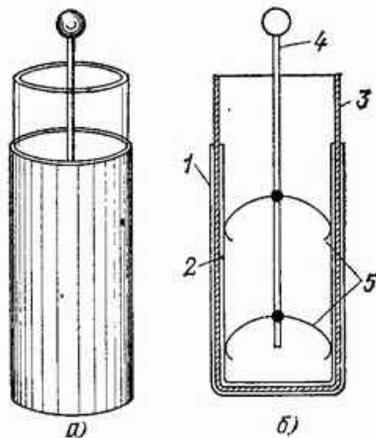


Рис. 12. Лейденская банка: а) общий вид; б) – в разрезе; 1, 2 – внешняя и внутренняя металлические обкладки, 3 – стеклянный стакан, 4 – металлический стержень, 5 – контакты.

Как же догадались заключить стеклянный стакан между металлическими цилиндрами? В первоначальном виде лейденская банка имела ещё более простое строение. Роль внутренней обкладки играла вода, а внешней – рука экспериментатора. Изобретение лейденской банки обязано *неверной гипотезе*. Голландский профессор Питер ван Мушенбрук (*Pieter van Musschenbroek*, 1692 – 1761) предположил, что вода может накапливать электричество. В 1745 году он наполнил банку водой, поместил в неё медную проволоку, соединённую с электрической машиной, взял банку в правую руку и велел помощнику вращать шар (рис. 13). Когда, по его мнению, банка достаточно зарядилась, он левой рукой попытался отсоединить проволоку. При этом он испытал сильнейший болевой шок.

Таким образом неверная гипотеза привела к полезному изобретению. Это лишний раз подтверждает, что физика – наука экспериментальная. Как бы ни были правдоподобны гипотезы, они нуждаются в экспериментальной проверке, и, напротив, неверные предположения могут побудить поставить эксперимент, который приведёт к важному открытию.

Действие тока очень болезненно. В Версале французский аббат Жан-Антуан Нолле (*Jean Antoine Nollet*, 1700 – 1770) устроил для французского короля «забавный» эксперимент. В цепь, взявшись за руки, выстроилось

по кругу 180 солдат. Крайний с одного конца солдат держал лейденскую банку, а с другого конца касался провода. При этом все участники вскрикивали и подпрыгивали, чем веселили короля. Возможно, от этой цепи солдат и произошло название «электрическая цепь».

Говорят, что идеи витают в воздухе. В том же 1745 году аналогичное устройство – «медицинскую банку» независимо от Мушенбрука сделал немецкий физик Эвальд Юрген фон Клейст (*Ewald Georg von Kleist*, 1700 – 1748).

Позже в лейденской банке воду заменили дробью, затем стало понятно, что достаточно обернуть банку снаружи и изнутри тонким слоем металла (можно фольгой), и лейденская банка приобрела современный вид. Правда, сейчас лейденские банки используются разве в школьной демонстрационной электрической (электрофорной) машине, созданной английским изобретателем Джеймсом Уимсхёрстом (*James Wimshurst*, 1832 – 1903, иногда переводят «Вимшурст») в 1880-ые годы (рис. 14). В технике лейденские банки заменили более удобные конденсаторы.



*Питер ван Мушенбрук  
(1692 – 1761)*



*Рис. 13. Опыт Мушенбрука  
с лейденской банкой*



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Будьте осторожны при использовании школьной электрофорной машины! Пользуйтесь ей только с разрешения и под присмотром учителя! Отсутствие источников тока обманчиво! При касании контакта Вы можете получить сильнейший болевой шок! Особенно осторожным нужно быть людям с заболеваниями сердца!



*Рис. 14. Школьная электрофорная машина*

## **«ЖИВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»**

Мушенбрук обратил внимание на то, что действие на человека разряда лейденской банки похоже на удар рыбы «торпедо». Он предположил, что рыба воздействует именно электричеством, а не ядом, как считалось ранее. Мушенбрук первым использовал термин «электрическая рыба».

Наблюдения над воздействием электрического ската успешно продолжил английский физик Джон Уолш (*John Walsh*, 1726-1795). В 1772 году он выяснил, что удар электрического ската передаётся по металлическому

проводнику, но не передаётся через стекло, дерево и другие изоляторы. Более того, он наблюдал искры, проскакивающие между полосками фольги, наклеенными на теле ската.

Сегодня мы знаем, что электрический скат способен создавать электрические импульсы до 200 вольт. И это не предел. Электрические угри, живущие в реках Южной Америки, способны создавать напряжение до 500 вольт и больше (рис. 15). Электрические органы этих рыб похожи на сложенные стопками батарейки, о которых речь ниже. У электрического ската эти органы занимают четверть тела, а электрический угорь заполнен ими почти целиком. Ещё со времён древнего Рима электрических рыб пытались применять в медицине. В XVIII веке врачи пытались использовать электрические машины с лейденскими банками. Большого успеха они не достигли, но в наше время сильные электрические разряды врачи используют, чтобы заставить сердце биться после временной остановки (это могут делать только врачи, не пытайтесь экспериментировать).

Если поразмыслить, то существование электрических рыб представляет серьёзную проблему для теории эволюции Дарвина. Невозможно представить, что такое количество стопок с батареями появилось у рыб сразу. С точки зрения эволюции сначала должно было сформироваться несколько органов – «батареек», затем, если эти особи получали эволюционное преимущество в борьбе за существование, их число должно было постепенно увеличиваться. Но одна «батарейка» у рыбы может создать напряжение меньше вольта, поэтому даже несколько «батареек» никого не могут убить и даже привести в оцепенение. Зачем же этим рыбам нужны были батарейки, пока они были слабыми?

Объяснение этого появилось только в 1950-ые годы. Немецкий учёный Ганс Лиссманн (*Hans Lissmann*, 1909 – 1995) исследовал несколько рыб, не имеющих мощных электрических органов, и показал, что электрические органы этим рыбам нужны для ориентирования и «переговоров» друг с другом (электрорецепция).

После появления электрических



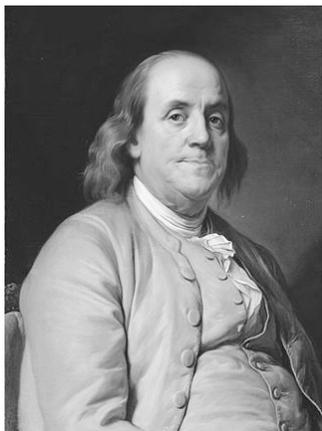
Рис. 15. Электрический угорь

машин многие пытались исследовать воздействие электричества на животных и растения. В частности, в 1753 году М. В. Ломоносов опубликовал свои наблюдения влияния электричества на растения: «Электрическая сила, сообщенная к сосудам с травами, рашение их ускоряет». Однако развитие электрофизиологии произойдёт после опытов Гальвани, о чём речь впереди.

## ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ЗАРЯДЫ

Таким образом, изобретение лейденской банки позволило выяснить электрическую природу действия рыбы «торпедо». Искры в электрических машинах всё больше напоминали молнии в грозу. Может, они тоже имеют электрическую природу? Этот вопрос волновал многих учёных, но наиболее убедительные наблюдения сделал американский изобретатель и политический деятель Бенджамин Франклин (*Benjamin Franklin*, 1706 – 1790).

В 1746 году Франклин присутствовал на лекции в Бостоне, где демонстрировалась лейденская банка Мушенбрука. Он заинтересовался электричеством и приобрёл необходимое оборудование (на рис. 16 электрическая машина, которую использовал Франклин).



*Бенджамин Франклин  
1706 – 1790*

В результате экспериментов с лейденской банкой Франклин приходит к выводу, что существует не два вида электричества, как считалось до него, а один. Он представлял электричество в виде «флюида» – особой электрической жидкости. По Франклину в одних предметах имеется избыток электрической жидкости, а в других – недостаток. Избыток электрической жидкости (в современной терминологии – положительный заряд) Франклин отнёс к «стеклянному» электричеству, а недостаток (отрицательный заряд) – к «смолянному» (янтарному). Используемая сейчас терминология положительных и отрицательных зарядов ведёт начало от Франклина.

Лейденская банка заряжается так, что снаружи заряд одного знака, а внутри – другого. Удостоверится в этом Франклин предложил с помощью простого эксперимента, который можно повторить сегодня в школе при наличии лейденской банки (только под контролем учителя!). Между обкладками лейденской банки нужно подвесить на непроводящей нити маленький шарик из фольги (Франклин использовал пробковый шарик), как показано на рис. 17. Пусть на внутренней обкладке положительный заряд, а на внешней – отрицательный. Когда маленький шарик касается контакта, соединённого со внешней обкладкой, он приобретает отрицательный заряд, который много меньше заряда на обкладке лейденской банки. После этого электрические силы отталкивают его от внешней и притягивают ко внутренней обкладке (рис. 17, а). Соударяясь со внутренней обкладкой, шарик отдаёт ей отрицательный заряд (рис. 17, б), заряжаясь положительно (рис. 17, с). Теперь электрические силы отталкивают его от внутренней и притягивают ко внешней обкладке (рис. 17, д). Соударяясь с электродом, шарик получает отрицательный заряд. Так, двигаясь между обкладками, шарик через некоторое время полностью разрядит обе обкладки лейденской банки.

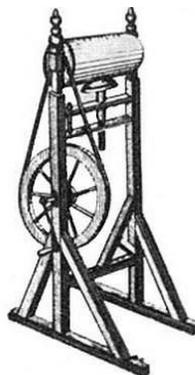


Рис. 16. Электрическая машина Франклина

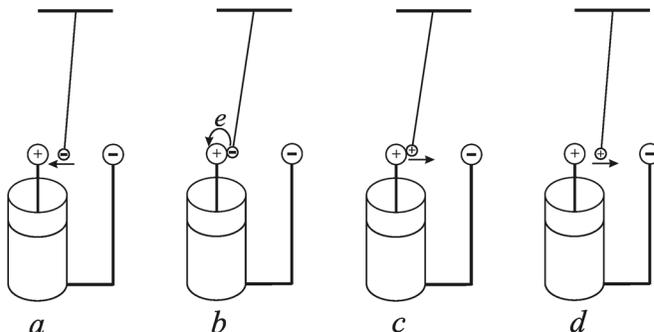


Рис. 17. Эксперимент с разрядом лейденской банки

Франклин предположил, что «электрическая материя» или электрический «флюид» состоит из крайне малых частиц, способных пронизывать металлы и пр. Избыток или недостаток этих частиц определяет знак заряда. При этом частицы не испытывают земного притяжения. Последнее следует из того, что при электризации масса тел не меняется. В целом, Франклин правильно описывает процессы в твёрдых телах. Сегодня мы называем эти малые частицы электронами. Масса электрона в 1000 раз меньше массы протона или нейтрона, и потому заметить изменение массы заряженного тела при обычном взвешивании невозможно.

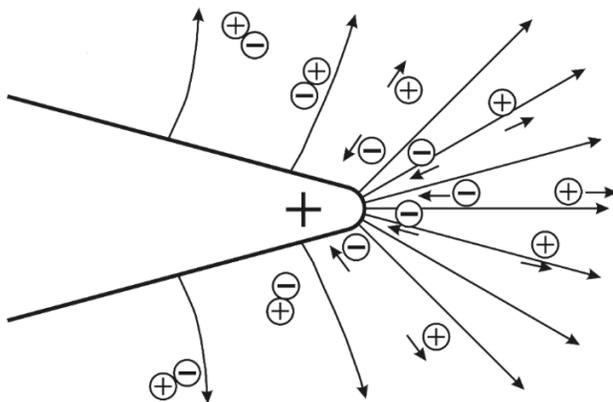
## МОЛНИЕОТВОД

Молниеотвод, или более звучное, но менее точное название – громоотвод, является привычным атрибутом современного города. Молниеотводы установлены на крышах домов, телебашнях, линиях электропередач... Ни одна бензозаправочная станция не может обойтись без молниеотводов. Как возникла идея защититься от молний?

Идея молниеотвода возникла у Франклина при исследовании электрической машины. Он обратил внимание, что если к электрической машине прикреплён заострённый металлический прут, то электрический заряд быстро стекает с него, причём без искр. Он решил, что если молния имеет электрическую природу, то заряд в атмосфере можно разрядить тихо, без молнии.

Куда девается заряд? Франклин описал свои наблюдения при работе с заряженной лейденской банкой. Если к внутренней обкладке прикрепить острую иголку, то в темноте можно наблюдать свечение. Наэлектризовать лейденскую банку с иголкой не удаётся, поскольку заряд всё время будет утекать с иголки. Более того, если поместить на внутреннюю обкладку металлический шар, а вблизи поместить острый предмет (длинный тонкий кинжал), то вокруг острия будет образовываться свечение. С тупым металлическим предметом свечения наблюдаться не будет.

Свечение иголки – это *коронный разряд*. Почему он возникает?



*Рис. 18. Ионизация молекул вблизи острия*

На рис. 18 показано положительно заряженное острие иглы. Заметим, что в электростатике не бывает идеальных острых углов, там напряжённость поля была бы бесконечна. Впрочем, идеальные острые углы бывают только в математике. Чисто теоретически на конце очень острой иглы может быть один атом, но даже атом – это не геометрическая точка, у него есть размер. Для удобства расчётов в электростатике острые предметы представляют (моделируют) в виде сферической поверхности с очень малым радиусом кривизны. Как бы ни был мал радиус сферы – доли миллиметра, микроны или меньше, это всё же не острый угол, а закруглённый конец, как показано на рис. 18.

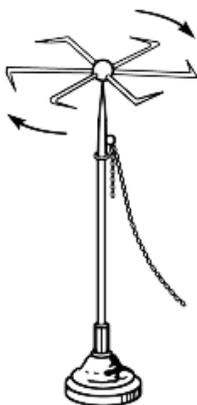
Франклин заметил, что вблизи острия электрические силы особенно значительны. Говоря современным языком, напряжённость электрического поля вблизи острия очень велика. На рис. 18 тонкими линиями обозначены силовые линии напряжённости электрического поля. Под воздействием этого поля происходит разделение молекул на положительно и отрицательно заряженные ионы. В воздухе в первую очередь будут ионизироваться молекулы воды, которых особенно много перед дождём. Если острие заряжено положительно, то к нему притянутся отрицательные ионы, которые уменьшат заряд на острие. Положительные заряды, напротив, будут удаляться от острия. На рис. 18 маленькими стрелками показано направление движения ионов. Если сила притяжения очень боль-

шая, то ионы могут разогнаться настолько сильно, что при ударе о другие молекулы будут испускаться фотоны, и возникнет свечение.



*Рис. 19. Коронный разряд на мачтах кораблей (огни святого Эльма) и на высоковольтных линиях*

Такое свечение (коронный разряд) хорошо известно морякам. Это огни святого Эльма, возникающие на мачтах кораблей перед грозой (рис. 19, слева). Описаны случаи свечения наконечников железных копий у воинов. В современном мире можно видеть свечение верхушек мачт высоковольтных линий (рис. 19, справа). Франклин первым доказал, что коронный разряд имеет электрическую природу.



*Рис. 20. Колесо Франклина*

Движение ионов можно «ощутить» с помощью «колеса Франклина», созданного им в 1746 году. Колесо состоит из нескольких острых металлических изогнутых стержней, которые могут вращаться, как показано на рис. 20. Колесо соединяют проводником с электрической машиной (сегодня можно использовать высоковольтные источники). Когда на колесо подают напряжение, оно начинает вращаться. Почему?

Чтобы понять причину движения колеса, нужно вспомнить, что вблизи заряженного острого металлического предмета образуются ионы. Ионы, притягиваясь к острым концам стержня, разгоняются, а затем ударяют по острым концам, передавая им

часть своего импульса (рис. 18). Направление движения колеса не зависит от знака заряда. Остриё всегда указывает в сторону, противоположенную направлению вращения.



ЭТО ИНТЕРЕСНО

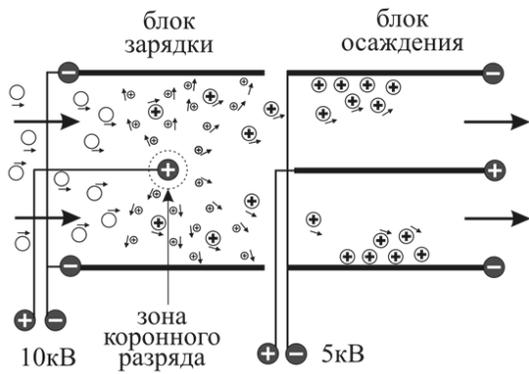
### ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР

Коронный разряд можно встретить не только перед грозой или на линиях электропередач. Во многих квартирах стоят устройства, создающие коронный разряд, причём хозяева зачастую даже не подозревают об этом. Речь идёт об электростатических фильтрах. Изобрёл их более 100 лет назад – в 1907 году американский инженер Фредерик Гарднер Коттрелл (*Frederick Gardner Cottrell*, 1877 – 1948). Первоначально он планировал бороться с кислотными туманами, но позже выяснилось, что его устройство способно собирать не только мельчайшие частицы воды, но и пыль, сигаретный дым, бактерии и пр. Электрические фильтры используются, как на производстве, так и в обычных квартирах.

Принципиальное устройство фильтра показано на рис. 21. Обычно фильтр состоит из двух блоков. В первом блоке (блок зарядки) расположены тонкие проволоки и пластинки. На них подаётся огромное напряжение – около 10 киловольт (в фильтрах для заводов напряжение может быть в 10 раз больше). Проволока тонкая, поэтому вблизи неё создаётся сильное электрическое поле, происходит ионизация молекул воздуха – возникает коронный разряд. На рис. 21 область ионизации показана пунктиром. При этом отрицательные ионы из области ионизации притягиваются к проволоке, а положительные устремляются к пластинам, как показано на рис. 21 (маленькие кружочки). Движущиеся ионы образуют поток воздуха – электрический ветер (в некоторых устройствах могут ставиться дополнительные вентиляторы для усиления потока).

Воздух с частицами пыли поступает в блок зарядки (на рис. 21 большие белые кружочки). Положительные ионы заряжают пылинки (на рис. 21 большие кружочки со знаком «+»). Хотя

пылинки очень маленькие, тем не менее они в миллионы раз больше ионов и не успевают осесть в блоке зарядки, а перемещаются во второй блок – блок осаждения. В нём находятся пластины, на которые подаётся напряжение. Обычно оно меньше, чем в первом блоке, но тоже составляет несколько киловольт.



*Рис. 21. Устройство электростатического фильтра*

Положительно заряженные пылинки в блоке осаждения притягиваются к пластинам, на которые подано отрицательное напряжение, и оседают на них. Остаётся время от времени удалять с пластин осевшую пыль. Таким образом, в электрический фильтр входит загрязнённый воздух, а выходит – очищенный.

Существенным достоинством электростатического фильтра является полное отсутствие шума – ведь там нет мотора – пылинки движутся за счёт «электрического ветра». Главным недостатком является то, что в сильно ионизированном воздухе возникает озон – он очень химически активен и не полезен для организма. Именно опасность образования большого количества озона ограничивает напряжение в бытовых фильтрах, предназначенных для обычных квартир. Для очистки промышленных выбросов применяют фильтры с напряжением в сотни киловольт. Относительно небольшое напряжение в бытовых фильтрах не всегда позволяет наблюдать свечение при коронном разряде.



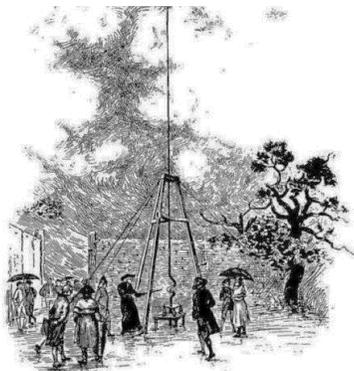
#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

В электрическом фильтре создаётся огромное напряжение в несколько киловольт! Его ни в коем случае нельзя включать в разобранном виде! Обычно при открывании фильтра электрическая цепь автоматически отключается, но лучше не искушать судьбу и отключать фильтр при удалении пыли с его стержней.

В 1750 году Франклин предложил идею эксперимента для проверки электрической природы молнии. Нужно сделать высокий заострённый металлический шест, нижний конец которого находится вблизи земли, но не касается её. Тогда, если молнии имеют электрическую природу, то во время грозы на шесте наведутся заряды, и внизу шеста проскочит искра.

Задуманный Франклином эксперимент удалось публично провести 10 мая 1752 года французскому физику Томасу Далибару (*Thomas Dalibard*, 1703 – 1799). Во время грозы он с помощью стального шеста на площади (рис. 22) извлёк из атмосферы длинные искры. Сам Франклин провёл эксперимент 12 апреля 1753 года. При этом Франклин использовал не шест, а сделанный из лёгкого шелкового платка в деревянной рамке воздушный змей. По углам рамки были помещены заострённые металлические стержни, поскольку Франклин уже знал, что острые стержни притягивают электричество. Франклин счёл, что намочшая в дождь бечевка будет хорошим проводником. К концу бечевки был привязан ключ (рис. 23). Чтобы тянущий бечевку человек не пострадал от молнии, к ключу был привязан непроводящий электричество шелковый шнур. Чтобы шелковый шнур не накал, запускавший змея человек должен был находиться под крышей. Как только грозовая туча оказалась над змеем, вокруг ключа наблюдалось сияние, а поднесённая к ключу лейденская банка заряжалась.

Эксперименты с грозовым облаком повторили многие учёные во всём мире, в том числе в России их провели Михаил Васильевич Ломоносов и Георг Вильгельм Рихман (*Georg Wilhelm Richmann*, 1711 – 1753). Благодаря этим экспериментам таинственная и грозная сила стала не более загадочной, чем искра в электрической машине.



*Рис. 22. Опыт Далибара*



*Рис. 23. Опыт Франклина*

С высоты сегодняшних знаний мы понимаем какая опасность подстерегала наблюдателей за молниями. Напряжение между облаками и Землёй достигает сотен миллионов вольт. Любой прямой контакт с проводом и даже нахождение на близком расстоянии грозит смертью. 6 августа 1753 года Георг Рихман погиб при проведении опытов с атмосферным электричеством.

Осенью 1753 года Франклин излагает устройство молниеотвода. Всё гениальное просто. Молниеотвод состоит из заострённого металлического шеста (молниеприёмник), который с помощью провода соединён с заземлением – металлическим стержнем, углублённым в земле (рис. 24). Учитывая важность изобретения для жизни людей Франклин отказывается его патентовать, чтобы молниеотвод могли установить все желающие. Сегодня молниеотвод устанавливается практически на все здания, даже на те, которые первоначально проектировались без молниеотвода (рис. 25).



*Георг Вильгельм Рихман  
(1711 – 1753)*

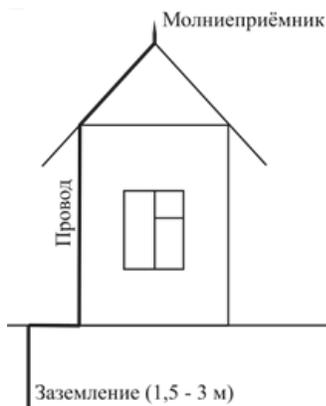
Как же работает молниеотвод? Он выполняет две функции:

1) когда грозовое облако находится над

молниеотводом, на острие наводится сильное напряжение, и острие притягивает близлежащие ионы (прежде всего частицы воды), вокруг острия возникает большая область, где нет заряженных частиц, которые могли бы стать проводником электрических зарядов, поэтому в этом месте молния не может проложить себе путь к земле;

2) если всё же молния ударяет в этом месте в молниеотвод, то она проходит по проводу в землю, не разрушая окружающие строения.

Заметим, что вопреки распространённому мнению, молнии ударяют в молниеотводы достаточно редко. Мнение, что молнии попадают преимущественно в молниеотводы, появилось, поскольку многие не учитывают первую функцию молниеотвода.



*Рис. 24. Устройство молниеотвода*



*Рис. 25. Молниеотвод на деревянном храме*



#### ЭТО ИНТЕРЕСНО МОЛНИИ И ТЕЛЕБАШНИ

По статистике в Останкинскую башню, возвышающуюся над Москвой, попадает около 50 молний в год. Попадают молнии и в Эйфелеву башню (рис. 26).

Изобретение молниеотвода было воспринято неоднозначно. Многие посчитали его посягательством на Божественную силу, насылающую на людей грозы. Например, в 1754 году чешский священник Проккоп Дивиш



Рис. 26. Молния попадает в Эйфелеву башню

(*Prokop Diviš*, 1698 – 1765) в Пршимне-тице установил молниеотвод высотой 40 метров. Но вскоре ему пришлось его демонтировать, поскольку прихожане посчитали, что молниеотвод стал причиной засухи. Отношение простых обывателей к техническому прогрессу красочно показал великий российский писатель Александр Николаевич Островский (1823 – 1886). В пьесе «Гроза» (1859), написанной через 100 лет после изобретения молниеотвода, изобретатель Кулигин стремится сделать жизнь людей лучше. Он предлагает установить молниеотводы. Но он не находит понимания у богатого купца Дикого, который говорит, что нельзя от божьего наказания «шестами да рожнами какими-то, прости Господи, обороняться».

Хотя изобретателем молниеотводов считается Франклин, молниеотводы использовались и раньше. Наклонная Невьянская башня в городе Невьянске, Свердловская область имеет остроконечный шпиль и проведённое к нему заземление (рис. 27). Башня была воздвигнута в 1721 – 1725 годах, т.е. раньше изобретения Франклина. К сожалению, её архитектор неизвестен. В Древнем Египте около храмов стояли столбы, обитые медью, возможно, они также выполняли роль молниеотводов. Но в любом случае, призыв ставить молниеотводы и объяснение как именно их ставить, первым сделал Франклин.



#### ЭТО ИНТЕРЕСНО

В природе тоже есть своего рода молниеотводы. В тропических лесах могучие стволы деревьев часто обвивают лианы (рис. 28). Лианы имеют лучшую проводимость, чем кора деревьев и их корни уходят в землю (хорошее заземление). При попадании молнии лиана может сгореть, но при этом дерево остаётся целым.



*Рис. 27. Невьянская  
башня*



*Рис. 28. Лианы*

## **ЗАКОН ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ**

Может показаться удивительным, но в течение полутора столетий после исследований Гильберта никто не установил количественных законов, описывающих электрические явления. В механике к 1700 году уже были установлены законы Ньютона, всемирного тяготения, закон Амонтона (величина силы трения), в оптике уже были известны законы отражения и преломления, уже был открыт закон Бойля – Мариотта для газов, но в электричестве всё ограничивалось качественными соображениями.

Это происходило из-за наличия серьёзных проблем. Во-первых, для установления количественных соотношений, нужны были стабильные условия измерений, а заряды со временем стекают, прежде всего, из-за наличия влаги. Во-вторых, силы взаимодействия были очень малы и их было сложно измерять с помощью приборов того времени.

Как же можно измерить величину заряда? Сегодня мы это можем сделать с помощью электроскопа. Первый электроскоп («версор») сделал ещё Гильберт. Через 150 лет английский физик Джон Кэнтон (*John Canton*,

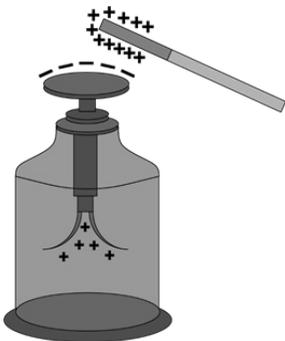


Рис. 29. Электроскоп

1718–1772) сделал электроскоп с расходящимися лепестками. В простейшем виде электроскоп представлял собой банку со стержнем, к концу которого прикреплены два лепестка (рис. 29). Если поместить на электроскоп заряд, то лепестки получают одинаковый заряд и начнут отталкиваться. Чем больше заряд, тем сильнее разойдутся лепестки.

Благодаря сделанному электроскопу Кэнтон в 1754 году заметил то, что ускользало от всех предыдущих исследователей. Для того, чтобы лепестки электроскопа разошлись, совсем не обязательно его касаться. Лепестки начинают расходиться уже при приближении заряда к электроскопу. Сейчас это явление называют *электростатической индукцией* от лат. *inductio* – «наведение». Внешний заряд «наводит» заряды на концы электроскопа.

Можно удивляться, что этого явления не замечали раньше, а можно удивляться тому, что Кэнтон неправильно объяснил это явление. Нужно иметь в виду, что Кэнтон пытался объяснить его на основе теории «истечений» Декарта. Эта теория оказалась не очень продуктивной и вскоре от неё отказались. Используя современную терминологию явление электростатической индукции можно объяснить так: при приближении положительного заряда к металлическому стержню под действием электрического поля электроны устремятся к поднесённому положительному заряду (рис. 30, сверху). В результате левый конец стержня зарядится отрицательно, а противоположный конец – положительно (рис. 30, в центре). Можно убедиться в том, что концы стержня действительно зарядились. Если, *не убирая внешнего заряда*, стержень посередине разъединить, то получится два заряженных проводника – один положительно, а второй – отрицательно (рис. 30, снизу).

Теперь становится ясным принцип работы электроскопа. При поднесении положительно заряженной палочки лепестки приобретут положительный заряд, как показано на рис. 29. Одинаковые заряды отталкиваются – лепестки разойдутся.

Читатели уже наверняка сообразили, как работает электроскоп Гильберта – «версор» (рис. 4). Если к стрелке «версора» поднести заряженный пред-

мет, например, с положительным зарядом, то электроны будут притягиваться к положительному заряду. В результате на одном конце стрелки электронов станет больше, т.е. накопится отрицательный заряд, а на другой стороне электронов станет меньше, там накопится положительный заряд. В результате стрелка «версор» будет притягиваться к внешнему положительному заряду и повернётся.

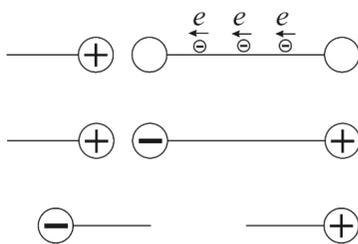


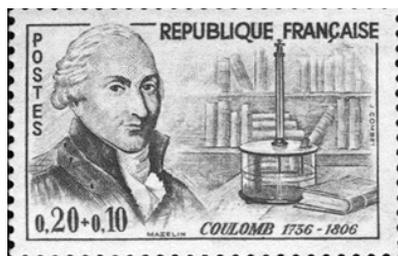
Рис. 30. Электростатическая индукция

Гильберт наблюдал, как его «версор» поворачивался к подносимому заряду, но он не знал о существовании индуцированного (наведённого) заряда на противоположном конце стержня.

На основе электростатической индукции столетием позже (в 1865 году) немецкие физики Август Тёплер (*August Toepler*, 1836 – 1912) и Вильгельм Хольц (*Wilhelm Holtz*, 1836 – 1913) почти одновременно создали электрофорную машину, которая способна создавать напряжение в десятки киловольт. Сейчас в школах для демонстраций по электричеству используют электрофорную машину (рис. 14), сделанную в 1880-ые годы Джеймсом Уимсхёрстом (*James Wimshurst*, 1832 – 1903, другое произношение – Вимшурст). Описание её устройства выходит за рамки нашей книги.

Для точного определения зависимости силы притяжения зарядов от расстояния между ними нужен был более совершенный прибор, чем электроскоп. Такой прибор в 1785 году создаёт французский военный инженер Шарль Огюстен де Кулон (*Charles-Augustin de Coulomb*, 1736 – 1806).

Будучи военным инженером, он исследовал трение, сопротивление материалов, в том числе кручение. Кулон изготовил крутильные весы (рис. 31), в которых сила измерялась по закручиванию тонкой упругой нити. Нить была столь тонка, что повороту в один градус соответство-



Шарль Огюстен де Кулон,  
1736 – 1806

вала сила (переводя на современный язык) в одну сто тысячную ньютона (это соответствует весу гирьки в одну тысячную грамма).

Устройство крутильных весов Кулона для измерения электрических сил показано на рис. 31. Весы представляли собой цилиндр  $A$ , высотой примерно 30 см, закрытый стеклянной крышкой  $C$ . В центре крепилась цилиндрическая стойка  $Y$  высотой 50 см с тонкой серебряной нитью. Сверху находилась вращающаяся головка  $b$ , а снизу – непроводящее коромысло  $P$ . На одном конце коромысла помещался наэлектризованный шарик, на другом – противовес  $g$ . Угол поворота измерялся по шкале  $Q$ .

Измерения показали, что сила отталкивания обратно пропорциональна квадрату расстояния между шариками. Затем Кулон провёл такие же измерения для зарядов разных знаков и получил ту же зависимость. Но

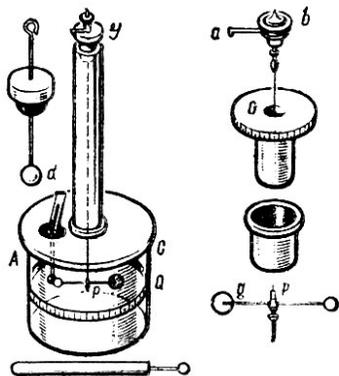


Рис. 31. Крутильные весы Кулона

как найти зависимость силы от величины заряда? Сегодня мы определяем заряд как раз из закона Кулона. Как же действовал Кулон?

Кулон исследует как распределяются заряды при соприкосновении тел, и получает, что если радиусы металлических шаров равны, то заряды распределяются поровну. Осталось найти силу взаимодействия заряда,  $\frac{1}{2}$  этого заряда,  $\frac{1}{4}$  заряда... и т.д. Кроме того, Кулон показал, что сила взаимодействия не зависит от матери

риала металлических шариков, а только от их заряда.

При оценке труда Кулона нужно иметь в виду, что кроме создания очень точных весов Кулон правильно выбрал объект исследования. Заряды можно разделить пополам, поднеся заряженный *металлический* шарик к такому же незаряженному. С янтарными, стеклянными и пр. шариками это сделать бы не удалось. Кроме того, Кулон правильно сделал, что работал с *точечными* зарядами, т.е. размеры зарядов были много меньше расстояний между ними. Если поднести заряженный шар близко к большому незаряженному металлическому шару, то за счёт *электростатической* индукции на большом шаре произойдёт разделение зарядов, и шары

будут притягиваться.

Сегодня мы знаем, что ещё в 1771 году закон Кулона открыл английский исследователь Генри Кавендиш (*Henry Cavendish*, 1731 – 1810), но Кавендиш *не считал нужным* публиковать результаты своих исследований, и о них узнали спустя 100 лет из архива Кавендиша.



#### ЭТО ИНТЕРЕСНО ЭЛЕКТРОСТАТИКА И ТОНЕР

Пользовались ли Вы сильно наэлектризованными мелкими частицами? Если Вы ответили, что нет, то, скорее всего, Вы пользовались, не зная об этом. Потому что порошок, который используют в лазерных принтерах и ксероксах (тонер), представляет собой очень сильно наэлектризованные мелкие частицы.

Насколько частицы должны быть мелкими? Обычно лазерные принтеры имеют разрешение 600 *dpi* (*dot per inch*), т.е. позволяют печатать 600 точек на дюйм. Дюйм равен примерно 25,4 мм, следовательно, частицы не должны быть больше  $25,4/600 = 0,042$  мм или 42 микрон. Чтобы получить разрешение 1200 *dpi* частицы должны быть в два раза меньше. На практике используют частицы от 5 до 30 микрон.

Но почему частицы электризуют, т.е. придают им заряд?

На это есть две причины.

Во-первых, частицы не должны слипаться. Если они начнут слипаться, то их размеры станут больше, и принтер уже не сможет печатать с нужным разрешением. Мы знаем, что одинаково заряженные частицы отталкиваются. Если зарядить все частицы зарядами одного знака (обычно их заряжают отрицательно), то они будут отталкиваться, не станут слипаться и даже соприкасаться, а станут парить в воздухе, отталкиваясь друг от друга. В лазерных принтерах обычно используют порошок из полиарилата стирола с добавлением красителей. Это вещество не проводит ток, поэтому наносимый при изготовлении частиц заряд сохраняется в течение долгого времени. Порошок иногда изготавливают дроблением (в более дешёвых вариантах), но при

этом частицы имеют острые грани, что уменьшает время службы барабана. Более дорогие порошки изготавливаются химическим путём, частицы получаются сферическими, что позволяет делать больше перезарядок картриджа.

В том, что частицы тонера не касаются друг друга легко убедиться. Если взять сахарницу с песком и чуть её наклонить, то сахарный песок останется неподвижен. Чтобы он начал сыпаться, сахарницу нужно наклонить на несколько градусов. Если же взять тонер в прозрачной упаковке, то создаётся впечатление, что внутри жидкость. При малейшем встряхивании или наклоне порошок перетекает, как жидкость.

Во-вторых, заряженные частицы переносятся на бумагу электрическими силами. Барабан заряжается отрицательно, чтобы частицы к нему не прилипали. В том месте барабана, куда должен попасть порошок, падает лазерный луч (отсюда и название «лазерный принтер») и нейтрализует заряд. Отрицательно заряженные частицы порошка попадают на незаряженные точки барабана, а затем перемещаются на положительно заряженный лист бумаги и прилипают к нему. Порошок при этом нагревается примерно до 200°C, плавится и впитывается в бумагу. Наверное, Вы замечали, что лист бумаги выходит из принтера горячим.

В более сложных принтерах и ксероксах используют магнитные порошки, но мы не ставим целью описать все системы принтеров – их слишком много.



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Мелкие частицы порошка (до впитывания на бумагу) при вдыхании опасны для здоровья! Некоторые тонеры (особенно дешёвые) могут содержать тяжёлые металлы. Если Вам нужно самостоятельно заправить картридж, делайте это только с разрешения и под контролем взрослых. Используйте респираторы или медицинские маски, после заправки нужно хорошо проветрить помещение. Но лучше воспользоваться услугами профессионалов, у которых есть специальное оборудование и помещения.

Помните, что число перезаправок картриджа ограничено. Современные лазерные принтеры и ксероксы практически не загрязняют воздух, но при многократной заправке картриджем из трещин может начать сыпаться порошок. Если при работе с принтерами и ксероксами у Вас появляется астматический кашель или аллергические реакции, то проверьте не сыпется ли порошок. Работа с неисправным картриджем, можно повредить принтер.

Рассыпавшийся порошок нужно собрать и удалить. Если порошок попал на одежду, его нужно по возможности быстрее удалить холодной водой с мылом, при стирке горячей водой порошок начнёт плавиться и избавиться от него будет сложнее. Собирать пыль обычным пылесосом бесполезно, поскольку мелкие частицы не будут удерживаться бытовыми фильтрами. Для сбора порошка нужны пылесосы со специальными фильтрами.

## ИТОГИ ПЕРВОЙ ГЛАВЫ

Электричество и магнетизм с древнейших времён до конца XVIII века развивались в основном за счёт многочисленных наблюдений. Постепенно наблюдения обобщались, анализировались, создавались гипотезы (например, что Земля – это магнит), планировались и проводились эксперименты (подчас смертельно опасные) для подтверждения гипотез. Благодаря наблюдениям были сделаны важные открытия и изобретения: созданы электрическая машина, конденсатор (лейденская банка), молниеотвод, которые станут стартовой площадкой для дальнейших исследований. Количественные измерения в электричестве – закон Кулона появились на сто лет позже, чем в механике (законы Ньютона, всемирного тяготения, Гука и др.), что связано со сложностью исследуемых объектов. К сожалению, и в XIX и в XX веке теория будет отставать от эксперимента, и многие открытия также будут сделаны благодаря случайным наблюдениям, о чём подробнее будет рассказано дальше.

## ГЛАВА. 2. СЛУЧАЙНЫ ЛИ СЛУЧАЙНЫЕ ОТКРЫТИЯ?

*В судьбе нет случайностей; человек скорее создаёт, нежели встречает свою судьбу.*

*Лев Николаевич Толстой*



*Луиджи Гальвани  
(1737 – 1798)*

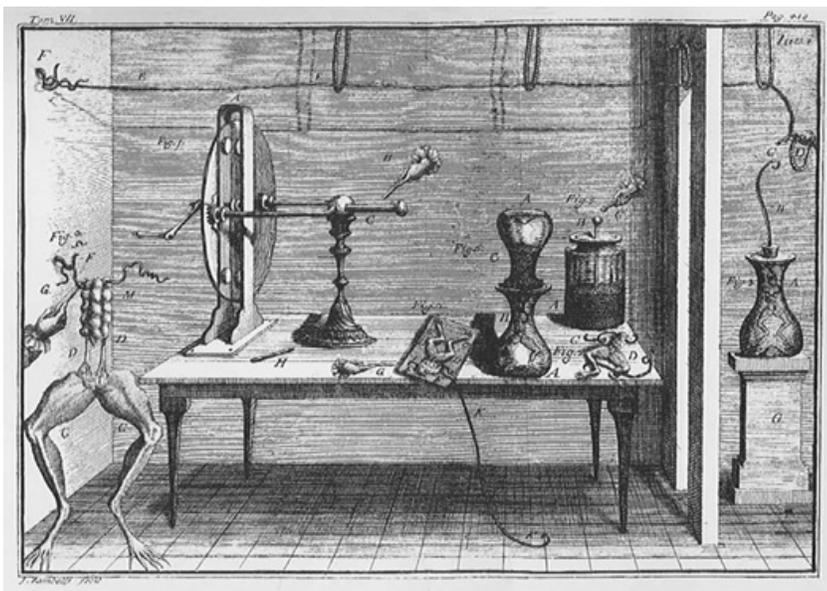
В истории электричества, да и в истории науки вообще, было очень много случайных открытий. Подобно тому, как полноводная река берёт начало с маленького ручейка, огромный поток исследований, связанных с электрическим током, начался с одного интересного явления, которое было обнаружено совершенно случайно. Профессор медицины Болонского университета (Италия) Луиджи Гальвани (*Luigi Galvani*, 1737 – 1798) проводил медицинские опыты. Вот как он сам описывает своё открытие, сделанное в 1780 г:

*«Я разрезал и препарировал лягушку и, имея в виду совершенно другое, поместил её на столе, на котором находилась электрическая машина при полном разобщении от контакта последней и на довольно большом расстоянии от него. Когда один из моих помощников острием скальпеля случайно очень легко коснулся внутренних бедренных нервов этой лягушки, то немедленно все мышцы конечностей стали так сокращаться, что казались впавшими в сильнейшие тонические судороги. Другой помощник<sup>1</sup> заметил, что это удаётся тогда, когда между контактами машины проходит искра. Удивлённый новым явлением, он тотчас же обратил на него моё внимание, хотя я замышлял совсем другое и был поглощён своими мыслями. Тогда я зажёгся невероятным усердием и страстным желанием исследовать это явление и вынести на свет то, что было в нём скрыто».*

Л. Гальвани. Трактат о силах электричества при мышечном движении. 1791.

<sup>1</sup> По некоторым сведениям, помощником, заметившим связь между искрой электрической машины и сокращением мышцы, была жена Гальвани Лючия.

Опыт Гальвани изображён на рис. 32. Казалось бы, Гальвани просто повезло. Ведь если бы вблизи лягушки не стояла бы работающая электрическая машина, то, скорее всего, он остался бы просто одним из многочисленных профессоров медицины, и его имя постепенно забылось. Но ведь «под лежащий камень вода не течёт». Если бы Гальвани не проводил множество экспериментов, если бы у него в лаборатории не работала электрическая машина, то он точно не сделал своего открытия.



*Рис 32. Опыт Гальвани*

Научный поиск чем-то напоминает поиск кладов или грибов в лесу. Кто-то идёт и собирает полную корзину, а идущий вроде бы рядом ничего не находит. Бывает, что неудача постигнет одного, другого и третьего... Спрятался гриб, пройдет грибник совсем рядом – и не заметит. Но если грибников много, то кто-нибудь обязательно наткнётся на грибное место. А если в лес не ходить и грибы не искать, то точно ничего не найдёшь. Возможно, здесь есть некоторая несправедливость: трудятся многие, а слава достаётся немногим, остальным остаётся только завидовать. Так что если Вы завистливы, то лучше найти какое-нибудь другое занятие, а если Вы выберете путь науки, то Вам нужно учиться радоваться за дру-

гих, нашедших истину быстрее Вас.

Электрическая машина работала у Гальвани тоже не совсем случайно. В те времена многие учёные работали с «новомодными» электрическими машинами, в том числе пытались использовать их для лечения людей. Идея, что электричество может воздействовать на мышцу, также была не новой. Новое в опыте Гальвани было то, что скальпель напрямую не касался машины. И когда Гальвани, даже не он сам, а его помощник, прикоснулся металлическим скальпелем к мышце лягушки при работающей электрической машине, то наведённый на скальпеле заряд прошёл через мышцу, заставив её сократиться. Да, Гальвани повезло, но не только. У него было три важных качества, без которых он не стал бы величайшим экспериментатором.

Во-первых, он был *готов увидеть новое*. Подумаешь, лапка дёрнулась... Можно было и не обратить внимание. Как уже выяснилось потом, подобный эффект за 30 лет (!) до Гальвани наблюдал другой профессор медицины того же Болонского университета Марко Антонио Кальдани (*Marc-Antonio Caldani*, 1725 – 1813), но не придавал ему значения.

Во-вторых, Гальвани не просто наблюдал интересный факт, но и всесторонне *исследовал* обнаруженное явление. Он многократно воспроизвёл эксперименты, изменяя условия, пытаясь понять, как зависит эффект от расстояния до электрической машины, будет ли действие передаваться через стекло, через кирпичную стенку и пр. Гальвани исследовал не только мышцы, но и нервные окончания, и доказал, что электричество передаётся по нервной ткани, положив тем самым начало новой науке – электрофизиологии. Но, кроме того, именно в процессе этих экспериментов Гальвани, тоже можно сказать случайно, сделал ещё одно важнейшее для дальнейшего развития науки открытие: лапка сокращалась и без электрической машины! Нужно было только прикоснуться к лапке проволоками из различных материалов (рис. 33).

В-третьих, Гальвани *опубликовал* результаты своих многочисленных экспериментов. Огромное число исследователей по всему миру стали повторять его эксперименты, получая новые интересные результаты. Самое удивительное, что Гальвани не понял до конца значения своего второго открытия с разными проволоками! Он был, прежде всего, врачом и искал «животное электричество», чтобы лечить людей. Но он был учёным и потому опубликовал свои работы, даже не до конца понимая всех причин

описываемых явлений. Это позволило другому учёному – Вольте сделать следующий шаг в развитии науки об электричестве.

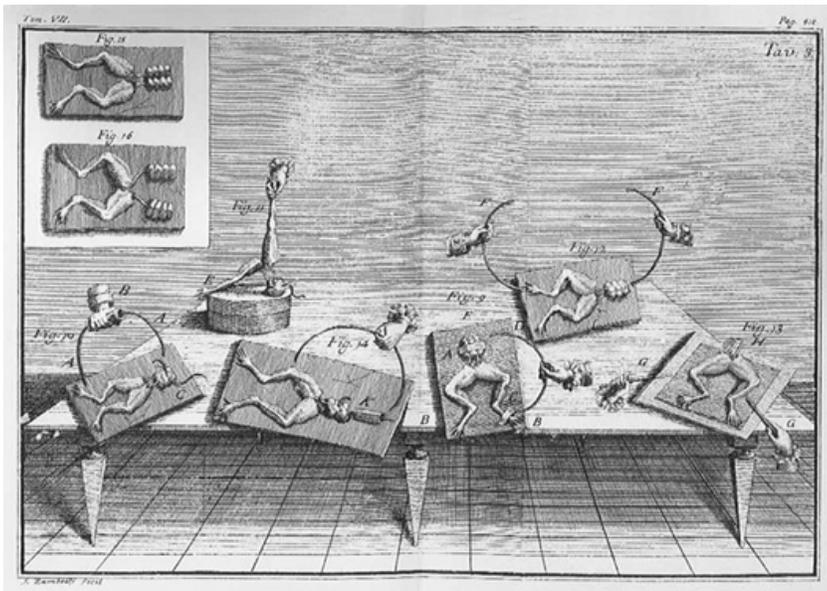


Рис. 33. Второй опыт Гальвани

Именно эти три качества вкупе со случайностью, которую можно назвать везеньем, позволили Гальвани открыть новую страницу в изучении электричества – перейти от электростатики к электрическому току.

Идеи Гальвани развил итальянский физик Алессандро Вольта (*Alessandro Volta*, 1745 – 1827). Когда Гальвани опубликовал результаты своих трудов, Вольта был профессором физики в университете города Павии (около Милана, Италия). Прочитав в 1791 году труд Гальвани, Вольта усомнился в правильности трактовки эксперимента с разными проволоками. Вольта



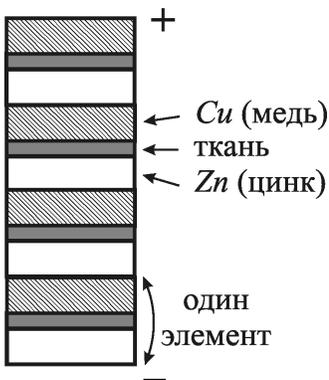
Алессандро Вольта (1745 – 1827)

проявил другое важное для учёного качество. Он много знал о результатах работ других исследователей и сопоставил эксперимент Гальвани с данными немецкого учёного Иоанна Зульцера (*Johann Sulzer*, 1720 – 1779), который ещё в 1752 году (т.е. ещё за 40 лет до описанных событий) обнаружил странное свойство олова и серебра. «Если два куска металла, один оловянный, другой серебряный, соединить таким образом, чтобы оба края их были на одной плоскости, и если приложить их к языку, то в последнем будет ощущаться некоторый вкус, довольно похожий на вкус железного купороса, в то же время каждый кусок металла в отдельности не даёт и следа этого вкуса...»

Казалось бы, что эти вкусовые ощущения имеют общего с опытами Гальвани? Но гениальность естествоиспытателей как раз и состоит в том, чтобы *видеть связи* между явлениями, которые не видны на первый взгляд. В науке это называется *ассоциативными связями*. Вольта посчитал, что соединённые металлы обладают особыми электрическими свойствами, а лапка лягушки была просто индикатором этих свойств. Для доказательства правоты нужно было создать источник тока. Здесь уже было не везенье, а годы упорного труда! Перепробовав различные соединения металлов, в 1799 году Вольта соединяет цинковую и медную пластины, поместив между ними ткань, смоченную кислотой. Чтобы усилить эффект Вольта придумал соединить множество таких пластин, получив «Вольтов столб». На рис. 34, слева показан общий вид вольтова столба, а справа – подробное строение.



Рис. 34. Вольтов столб



Вольта изобрёл первый в мире химический источник тока – батарейку! Сегодня в бесчисленном количестве устройств используют батарейки всевозможных форм и размеров. Самое удивительное, что их принцип строения не изменился со времён Вольта: два разных металла и между ними электролит – вязкий солевой, щелочной или кислотный раствор, обычно, в виде густого геля. Зачем нужен электролит? Скорее всего, Вольта сам этого до конца не понимал – просто влажную ткань он использовал вместо мышцы лягушки. Вольта был выдающимся экспериментатором, но не смог придумать теории построенного им источника тока. Это сделал примерно через 30 лет великий английский физик и химик Майкл Фарадей (*Michael Faraday*, 1791 – 1867), о котором речь впереди.

Будучи настоящим учёным, Вольта сразу публикует результаты своих исследований – в 1800 году он посылает письмо в Лондон. Созданная им батарея сразу же была по достоинству оценена. Его письмо было опубликовано в «Философских трудах» Королевского общества. В том же 1800 году английские учёные Уильям Николсон (*William Nicholson*, 1753 – 1815) и Энтони Карлайл (*Anthony Carlisle*, 1768 – 1842) собрали по описаниям Вольты столб из семнадцати пар пластинок и с его помощью разложили воду на кислород и водород, дав начало целой отрасли физической химии – электролизу. Так что можно сказать, что изобретение Вольты сразу же нашло важное практическое применение.

К сожалению, Гальвани было не суждено узнать об изобретении Вольты. Его жизненный путь трагически прекратился. В 1796 году войска Наполеона вошли в Болонью. Гальвани отказался присягать новому правительству, был изгнан из университета, больше не мог ставить эксперименты и в 1798 году умер в нищете.

Открытие Вольты сразу же побудило учёных по всей Европе начать опыты по изучению до того невиданного явления – постоянного электрического тока. Не осталась в стороне и Россия. В 1802 году профессор Петербургской медико-хирургической академии Василий Владимирович Петров (1761 – 1834) собрал уникальную по своей мощности батарею. Столб состоял из 4200 (!) медных и цинковых дисков диаметром 3,5 сантиметра. В качестве электролита он применил нашатырь, которым пропитывал бумажные диски. Поскольку тяжёлые столбы выжимали нашатырь из нижних дисков, Петров расположил их горизонтально в специально сделанном деревянном ящике. В переводе на наши единицы измерения батарея Петрова создавала напряжение около 1500 вольт и поддерживала



*Василий Владимирович  
Петров (1761 – 1834)*



*Ганс Христиан Эрстед  
(1777 – 1851)*

ток около 0,2 ампер.

С помощью своей батареи Петров наблюдал электрическую дугу. Он подсоединил к батарее два угольных стержня и, когда расстояние между ними стало менее сантиметра, то возникло пламя белого света. К сожалению, Петров опубликовал эти и другие результаты только на русском языке, и они остались неизвестными в западной Европе.

Неподвижные заряды не чувствительны к магнитному полю. Электрический ток взаимодействует с магнитами. В 1800 году ещё никто не помышлял о связи электрических и магнитных полей. Такое открытие могло произойти только случайно. Но с 1800 года батареи появляются практически во всех научных лабораториях, электрические явления исследуют огромное число учёных. Оставалось только ждать, кто же первым заметит взаимодействие электрического тока с магнитами.

Существует мнение, что первым взаимодействием вольтова столба с магнитной стрелкой в 1802 году наблюдал итальянский философ и юрист Джованни Доменико Романьози (*Gian Domenico Romagnosi*, 1761 – 1835). Но в его опытах цепь была не замкнута, электрического тока не было, и не вполне ясно, что именно он наблюдал. Так или иначе, его эксперименты в 1802 году не произвели сенсации в научном мире. Слава первооткрывателя взаимодействия электрического тока и магнитной стрелки досталась датскому физика Гансу Христиану Эрстеду (*Hans Christian Oersted*, 1777 – 1851).

В 1820 году, спустя 20 лет после создания вольтова столба, случай помог

Эрстеду сделать следующий шаг в раскрытии тайн природы. К этому времени он уже был профессором физики в Копенгагенском университете (Дания). Эрстед был сторонником немецкого философа Фридриха Шеллинга (*Friedrich Schelling*, 1775 – 1854), который принадлежал к философской школе «романтизма» и проповедовал взаимосвязь всех явлений в природе. В 1812 году Эрстед создаёт труд: «Исследование идентичности электрических и химических сил». По всей видимости, он задумывался о единстве электрических и магнитных сил, и ему помог случай. В 1820 году на лекции в университете Эрстед демонстрировал тепловое действие тока. При этом на столе стоял компас. При замыкании цепи стрелка компаса отклонилась. По разным данным отклонение стрелки заметил сам Эрстед или слушатели лекции. Важно, что факт отклонения стрелки не остался без внимания. Будучи настоящим учёным, Эрстед, обнаружив явление, начал его всесторонне исследовать. Он брал проволоки из различных материалов, исследовал зависимость от расстояния, от наклона проволоки и пр. В частности, он обнаружил удивительный факт: если провод перпендикулярен направлению стрелки, то он на неё не действует. Эрстед не стал откладывать публикацию своих результатов и опубликовал их уже летом 1820 года (на латыни).

Особая красота опыта Эрстеда в том, что его очень легко воспроизвести. Для этого нужны только компас, батарейка (источник тока) и провод (чтобы не испортить батарейку её нужно включать через небольшое сопротивление). Компас нужно расположить как можно ближе к проводу, как показано на рис. 35, слева. При пропускании тока стрелка компаса повернётся – рис. 35, справа. Буквы *N* и *S* обозначают концы стрелки компаса, указывающие на северный (*North*) и южный (*South*) полюса.

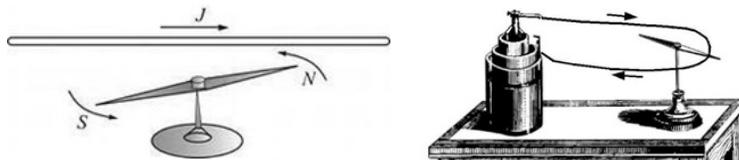


Рис. 35. Опыт Эрстеда

Чуть позже, в том же 1820 году Эрстед показал, что эксперимент можно поставить «наоборот»: если поднести магнит к подвешенному проводу, то провод начнёт вращаться. Одновременно с Эрстедом этот результат получил Ампер, о котором речь впереди.



Томас Иоганн Зеебек  
(1770 – 1831)

Нужно заметить, что эксперименты Гальвани, Вольты, Эрстеда и др. намного опередили своё время – знаний о строении вещества было мало, не было никакой теории, которая могла бы помочь объяснить эти явления. Эрстед объяснял влияние тока на «магнитную жидкость» возникновением особых вихрей «электрического флюида», но ясности это не приносило.

Простота постановки опыта Эрстеда и громадная значимость результатов вызвала поток работ, посвящённых исследованию этого эффекта. И сразу же (в 1821 году) ещё одна счастливая случайность привела к созданию нового источника тока. Томас Иоганн

Зеебек (*Thomas Johann Seebeck*, 1770 – 1831), член Прусской академии наук, известный к тому времени своими работами в области оптики, акустики и теплоты, узнав об открытии Эрстеда, решил заняться исследованием нового явления. Он решил проверить, действительно ли магнетизм является обязательным проявлением электрического тока или в каких-то случаях его может не быть. Он соорудил компас собственной конструкции из немагнитных материалов: основание было из висмута (в других опытах – из сурьмы), а крышку сверху сделал из меди, как показано на рис. 36. Сложно сказать, какие опыты планировал Зеебек, но, дотронувшись рукой до соединения металлов, он обнаружил небольшое отклонение стрелки компаса. Эффект был слаб, и, возможно, кто-то другой и не заметил его, но Зеебек был опытным экспериментатором и, главное, он *искал эффект*, хотя и не от прикосновения руки к контакту. Зеебек стал исследовать обнаруженное явление. Он установил, что эффект связан с нагревом контакта рукой, и он усиливается, если контакт между металлами нагревать не рукой, а огнём (рис. 36). Так было создано устройство, поддерживающее ток за счёт разности температур между контактами *A* и *B* (рис. 36). Напряжение при этом очень мало. Для контакта висмут – медь при разности температур в  $100^{\circ}\text{C}$ , напряжение составляет менее  $0,01\text{ В}$ .

Эксперименты тех лет намного опережали теорию. Занятно, что сам Зеебек считал, что спай двух немагнитных металлов приобретает магнитные свойства, причём эти магнитные свойства зависят от температуры,

и назвал свой эффект «термомагнетизмом». Эрстед, узнав об опытах Зеебека, понял, что открыт новый источник тока, а не магнетизма, и назвал обнаруженный эффект «термоэлектричеством», как мы называем его и сейчас.

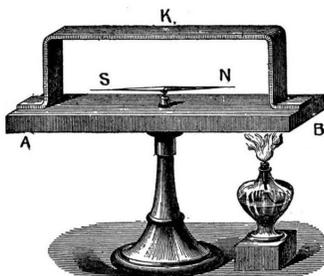


Рис. 36. Опыт Зеебека

Объяснение эффекта Зеебека было дано только в XX веке. Основанный на эффекте Зеебека способ измерения разности температур применяется и в наши дни. Такое устройство называется *термопарой*. Её принципиальная схема представлена на рис. 37. В простейшем варианте используются два провода из металлов *A* и *B*. Чёрными точками обозначены два контакта, которые находятся в средах с температурами  $T_1$  и  $T_2$ . В зависимости от задачи используются различные металлы и сплавы: платина, вольфрам, железо, медь, константан (сплав меди, никеля и марганца), хромель (сплав хрома и никеля) и др. Измерив напряжение на вольтметре и зная материал проводов, можно по специальным таблицам определить разность температур  $T_1$  и  $T_2$  с высокой точностью (до тысячных долей градуса и даже точнее).

Поскольку в эксперименте Эрстеда отклонение стрелки зависело от силы тока, возникла мысль использовать это явление для количественного измерения силы тока, причём измерять не только сильные, но и слабые токи. Уже в 1820 году немецкий физик Иоганн Швейггер (*Johann Schweigger*; 1779 – 1857), профессор университета в городе Галле (*Halle*, недалеко от Лейпцига) вместо прямого провода воздействовал на стрелку

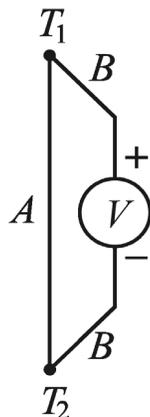


Рис. 37.  
Термопара

компыа витком с током. Для усиления эффекта он намотал катушку из многих витков и назвал свой прибор «мультипликатором» (от лат. *multim* – много). Устройства мультипликатора показано на рис. 38. Швейггер справедливо предположил, что магнитные действия витков тока будут складываться и, таким образом, усиливаться. «Мультипликатор» Швейггера в дальнейшем совершенствовали разные учёные, но идея конструкции «мультипликатора» дошла до наших дней, хотя название изменилось: сегодня мы называем его *гальванометром* или *амперметром*. А провод, свёрнутый в виде спирали назвали соленоидом (рис. 39).

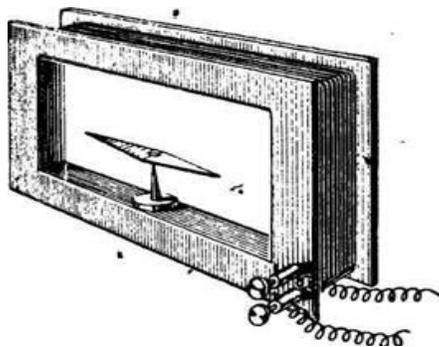


Рис. 38. Мультипликатор Швейггера



Рис. 39. Соленоид



#### ЭТО ИНТЕРЕСНО ГАЛЬВАНОМЕТР

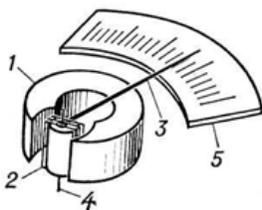
Используемый в настоящее время для школьных экспериментов гальванометр создал в 1881 году французский физик Жак Арсен д'Арсонваль (*Jacques Arsène d'Arsonval*, 1851 – 1940). Его главное достоинство – это простота. Устройство гальванометра представлено на рис. 40. Он состоит из постоянного магнита (1), между полюсами которого находится подвижная катушка (2) со

стрелкой (3) на гибких подвесках (4). Когда через катушку течёт ток, она поворачивается, причём угол поворота пропорционален силе тока. Величину отклонения можно определить по шкале (5). После выключения тока гибкая подвеска возвращает стрелку в исходное положение. *Внешний вид современного школьного гальванометра показан на рис. 41.*

д'Арсонваль был не только физиком, но и врачом и одним из первых предложил использовать электрический ток для лечения больных, проложив начало электротерапии.



*Жак Арсен д'Арсонваль (1851 – 1940)*



*Рис. 40. Устройство гальванометра д'Арсонваля*



*Рис. 41. Школьный гальванометр, внешний вид*



*Андре-Мари Ампер (1775 – 1836)*



*Рис. 42. Электромагнит*

Больших успехов в изучении магнитных свойств тока достиг французский физик Андре-Мари Ампер (*Andre-Marie Ampere*, 1775 – 1836).

В 1820 году Ампер был профессором физики в Коллеж де Франс (Париж). До этого времени он занимался исключительно математикой. Узнав об опытах Эрстеда, Ампер, до того не проводивший экспериментов, активно принялся экспериментально исследовать магнитные свойства токов. Только за осень – зиму 1820 года он обнаружил множество эффектов. Он сформулировал правило отклонения стрелки (правило Ампера), ввёл сам термин «электрический ток», продемонстрировал действие магнитного поля Земли на движущиеся проводники с током. Оказалось, что совсем необязательно иметь магнитный стержень – два параллельных проводника с током притягиваются без всякого компаса (если токи текут в одном направлении).

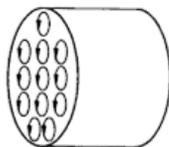
Ампер также изучал магнитные свойства соленоида и обнаружил схожесть соленоида и стрелки компаса. При этом он выяснил, что железный сердечник, вставленный в соленоид, усиливает магнитное поле. На основе этих результатов в 1825 году английский изобретатель Уильям Стёрджен (*William Sturgeon*, 1783 – 1850) сделал первый электромагнит, который по силе значительно превосходил природные магниты такого же размера. Электромагниты сегодня широко используются в промышленности. Подъёмные краны с электромагнитами могут поднимать тонны железных грузов (рис. 42).

Почему свойства токов и железных магнитов похожи? Может быть, проводник с током становится магнитом? Ампер выдвинул прямо противоположенную идею: магнитные свойства железа обусловлены электрическими токами, подобно круговым токам в соленоиде, как показано на рис. 43. Измельчение железа не приводит к потере магнитных свойств.

Следовательно, токи должны иметь малые размеры, сравнимые с размерами молекул. Каждый молекулярный ток мал, но если их много, то они должны дать значительный эффект. Гипотезу Ампера удалось подтвердить только в начале XX века, когда стали больше знать о строении атома. В классической планетарной модели атома, предложенной английским физиком Эрнестом Резерфордом (*Ernest Rutherford*, 1871 – 1937) электроны обращаются вокруг ядра, подобно тому, как планеты обращаются вокруг Солнца. Быстрое обращение электрона можно рассматривать как круговой ток, который создаёт магнитное поле. Поскольку электроны обращаются в разные стороны, то у большинства тел магнитные свойства незаметны. Позже оказалось, что классическая планетарная модель атома не может объяснить всех магнитных явлений, которые были описаны только с помощью квантовой физики, но это уже тема для другой книги.

С открытий Ампера начинается новая страница исследования магнетизма. Постоянные магниты неудобны для экспериментов: сложно сделать два одинаковых магнита, они могут иметь разные формы, размеры, материалы могут иметь различные примеси. Но даже если сделать два одинаковых железных бруска, как их намагнитить до одной величины? И как сохранять их силу? Ведь магниты могут размагничиваться. Теперь для исследования магнитных явлений стало возможным использовать проводники с регулируемыми электрическими токами.

Сразу же после доклада Эрстеда в 1820 году французские физики – эксперимен-



*Рис. 43. Гипотеза Ампера*



*Жан Батист Био  
(1774 – 1862)*



*Феликс Савар (1791–1841)*



*Пьер-Симон, маркиз де Лаплас (1749 – 1827)*



*Георг Симон Ом (1787 – 1854)*

таторы Жан Батист Био (*Jean Baptiste Biot*, 1774 – 1862) и Феликс Савар (*Felix Savart*, 1791–1841) занялись исследованием величины силы воздействия на магнитную стрелку в зависимости от формы и удалённости проводника. Уже 30 октября 1820 года они доложили о полученных результатах. Французский математик Пьер-Симон, маркиз де Лаплас (*Pierre-Simon de Laplace*, 1749 – 1827) получил формулу, описывающую результаты экспериментов Био и Савара. Сейчас эта формула известна как «закон Био-Савара-Лапласа». Она является аналогом закона Кулона для магнитного поля.

Может показаться удивительным, что на один 1820 год приходится такое большое число открытий. Действительно, открытие Эрстедом связи между электрическими и магнитными явлениями, побудило огромное число физиков заняться исследованиями в этой области. Появление гальванометра позволило проводить количественные эксперименты. В эти годы был ещё открыт закон Ома, который есть в любом школьном учебнике по физике. Открытие этого закона – это уже не случайность, а пример сложной кропотливой работы. Немецкий физик Георг Симон Ом (*Georg Simon Ohm*, 1787 – 1854) пытался установить зависимость между током и напряжением.

Казалось бы, что же тут сложного, любой школьник может за один урок проверить этот закон. Но здесь есть «тонкий момент», на который не все обращают внимание. Обычный школьный стрелочный вольтметр, по сути, является гальванометром с включённым в него последовательно большим сопротивлением. Гальванометр непосредственно измеряет текущий через него ток, а напряжение определяется уже с использованием закона Ома. Так что стрелочный вольтметр уже использует закон Ома. Цифровые вольтметры устроены ещё сложнее, но об этом

речь впереди. Чтобы «честно» измерить напряжение, нужно пользоваться не обычным вольтметром, а электроскопом (его также называют статическим вольтметром). Но электроскопом хорошо измерять большие напряжения. Попробуйте измерить школьным электроскопом напряжение батарейки – вряд ли у Вас что-либо получится.

А, может, не нужно измерять напряжение? Ведь эксперимент по проверке закона Ома можно поставить и так: пусть есть батарея с постоянным напряжением, а мы будем менять сопротивление: подсоединять одно, два, три сопротивления и смотреть на изменение силы тока. Сопротивления, правда, во времена Ома не выпускались, но можно сделать самим из проволочек. Однако перед исследователями тех лет стояла серьёзная проблема – элемент Вольта не давал стабильного напряжения. Даже современные батарейки намного более высокого качества со временем «слабеют», т.е. их напряжение уменьшается. В те времена нельзя было рассчитывать на постоянные напряжения даже в пределах часа.



*Рис. 44. Схема опыта Георга Ома*

Для преодоления этой сложности Ом воспользовался только что открытым эффектом Зеебека. Он соорудил термопару из меди и висмута: один конец был в кипятке, второй – в тающем снегу, таким способом Ом поддерживал постоянство температур. Кроме того, ему нужно было учесть

сопротивление гальванометра. Ом получил две зависимости: 1) обратная величина тока линейно зависела от длины медной проволоки; 2) сила тока была пропорциональна разности температур. Видимо, Ом считал само собой разумеющимся, что у термопары напряжение пропорционально разности температур.

Возможно, кому-то покажется закон Ома очевидным: «Разве может быть иначе»? Оказывается, очень даже может. Закон Ома (т.е. линейная зависимость тока от напряжения) справедлив только для проводников, и то при постоянной температуре. Существует огромный класс веществ – полупроводников, для которых закон Ома не применим. И очень хорошо, что не применим, потому что благодаря этому стало возможным развитие современной электроники, но не будем забегать вперёд.

## ИТОГИ ВТОРОЙ ГЛАВЫ

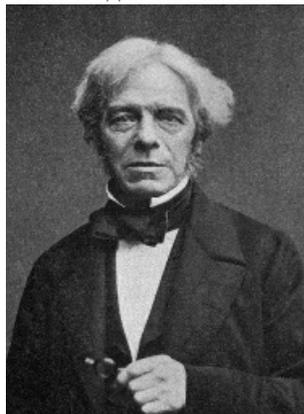
Опыты Гальвани привели к созданию Алессандро Вольтой в 1799 году первого источника постоянного тока. С этого времени учёные всего мира начинают активные исследования свойств электрического тока. Случайные наблюдения и кропотливая работа позволили открыть основные законы электричества и магнетизма. Можно сказать, что в те времена каждый новый эксперимент давал новую научную информацию. Важнейшим открытием был опыт Эрстеда (1820), показавший, что электрический ток обладает магнитными свойствами. Однако до 1831 года оставался нерешённым вопрос: возможно ли с помощью магнитов получать электричество?

## ГЛАВА. 3. МАЙКЛ ФАРАДЕЙ: СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И МАГНЕТИЗМА

*Работай. Закончи. Опубликуй.*  
М. Фарадей

Мы уже увидели, что наука об электричестве развивалась благодаря сочетанию случайного везенья и упорного кропотливого труда. Обратим внимание ещё на одно важное качество исследователя – *широкий научный кругозор* и умение применять результаты из одной области науки в другой. Для научного поиска часто требуется знание разных наук. Гальвани был врачом, но он знал также физику, недаром у него в лаборатории была электрическая машина. Он работал на стыке наук и стал основоположником электрофизиологии. Эрстед занимался не только электричеством, но и химией и написал труд: «Исследование идентичности электрических и химических сил». Казалось бы, причём здесь химия? Дело в том, что развитие науки об электричестве упиралось в тогда ещё слабое понимание строения вещества, а для изучения веществ нужна химия.

После того как Эрстед в 1820 году установил, что электрический ток создаёт магнитные силы, можно было ожидать наличие обратного эффекта, что магниты могут создавать электрический ток. Сегодня мы называем это явление *электромагнитной индукцией*. Однако открыть электромагнитную индукцию не могли в течение 11 лет, хотя этим занимались многие видные учёные. Сегодня мы знаем, чтобы вызвать электрический ток, нужно либо изменить величину магнитного поля, либо площадь или ориентацию витка с током. Но в те времена ещё не было самого понятия поля, ни магнитного, ни электрического. Поэтому понадобилось 11 лет после открытия Эрстеда, чтобы английский физик и химик Майкл Фарадей (*Michael Faraday*, 1791 – 1867) и практически одновременно с ним американский физик Джозеф Генри (*Joseph Henry*, 1797 – 1878) провели экспе-



*Майкл Фарадей*  
(1791 – 1867)

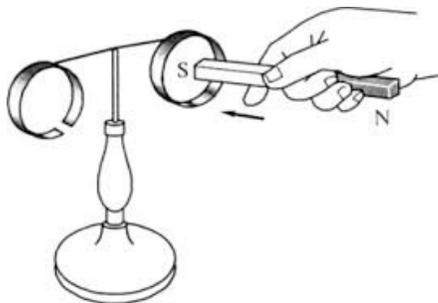


*Джозеф Генри  
(1797 – 1878)*

рименты, которые сегодня может сделать каждый школьник.

Если вспомнить аналогию научного открытия с поиском грибов, то Ампер прошёл мимо гриба, не заметив его или приняв его за не очень ценный. Он был в одном шаге от открытия электромагнитной индукции в 1822 году. Ампер подвесил кольцо из медной проволоки и, двигая магнит вдоль оси кольца, слегка притянул проволоку к магниту. Сегодня такой эксперимент проводят в школе, чтобы продемонстрировать правило Ленца (рис. 45). Но эффект у Ампера был очень слабым, кроме того Ампер не доказал, что притягивание вызвано наличием

тока в кольце. Многие с недоверием отнеслись к эксперименту Ампера. Медь не обладает магнитными свойствами, но ведь медная проволока могла содержать примесь железа и именно потому притягивалась магнитом.



*Рис. 45. Притяжение немагнитного кольца к подвижному магниту*

Очень близок к открытию электромагнитной индукции был знаменитый французский физик – экспериментатор Доминик Франсуа Жан Араго (*Dominique Francois Jean Arago*, 1786 – 1853). Известно, что если стрелку компаса вывести из положения равновесия, то она начинает колебаться. Вы сами можете без труда увидеть эти колебания, правда, для этого нуж-

но взять компас, у которого стрелка вращается на иголке, а не погружена в вязкую жидкость. В 1824 году Араго обратил внимание, что если расположить под компасом медную пластину, то колебания затухают намного быстрее. Заинтересовавшись этим фактом, он раскручивал медный диск над или под компасом и наблюдал отклонение стрелки. К сожалению, Араго не понял, что отклонение связано с токами в медном диске, вызванными воздействием магнитной стрелки. Поэтому результаты эксперимента Араго оставались загадкой до 1831 года. Другие учёные тоже были близки к открытию. Но слава досталась Фарадею.

Жизнь и творчество Фарадея является ярким примером того, как человек может быть сильнее обстоятельств. Вольта воспитывался в доме дяди – священника, Ампер был сыном коммерсанта, Эрстед – сыном преуспевающего аптекаря. Они получили прекрасное университетское образование, Гальвани получил даже два образования в Болонском университете – по богословию и медицине. Майкл Фарадей родился в семье кузнеца, семья жила в нужде. В 13 лет он был вынужден оставить школу и начать зарабатывать на жизнь. Казалось бы, каким учёным может стать человек, не получивший даже среднего образования? Но Майкл проявил удивительную настойчивость. Он устроился работать в книжный магазин переплётчиком. В магазине были книги по химии и электричеству, и они стали учебниками для Фарадея.

В 19 лет Фарадей, так и не закончив школы, ходил в Городское философское общество слушать лекции по физике и астрономии. В 1812 году один из членов общества подарил увлечённому науками юноше билет на цикл публичных лекций в Королевском институте английского физика, химика и геолога Гемфри Дэви (*Humphry Davy*, 1778 – 1829). Фарадей прослушал лекции Дэви, составил и переплёл конспект этих лекций, послал их Дэви и попросил взять себя на работу в Королевский институт.

Дэви сам был из бедной семьи, постигал основы химии, будучи учеником аптекаря. Он решил помочь юноше и взял его лаборантом. Позже Дэви, внёсший боль-



*Гемфри Дэви (1778 – 1829)*

шой вклад в развитие химии, открывший свойства многих химических соединений, говорил, что главным его открытием было открытие Фарадея. Фарадей помогал лекторам в подготовке лекций, слушал эти лекции и начал сам проводить химические эксперименты под руководством Дэви.

Когда в 1820 году Эрстед открыл влияние электрического тока на компас, Фарадей уже выполнил несколько интересных работ по химии. Узнав об экспериментах Эрстеда, Фарадей начал заниматься исследованием электромагнетизма. Уже в 1821 году он создаёт установку, в которой стрелка компаса непрерывно вращается. Значение этого труда сложно переоценить. Фарадей создал первый, пусть маломощный *электродвигатель*.

К сожалению, Фарадей допустил непростительную оплошность. Опубликовав результаты экспериментов, он не упомянул, что использовал идеи известного английского физика и химика – Уильяма Хайда Волластона (*William Hyde Wollaston*; 1766 – 1828). Волластон к тому времени уже был именитым учёным, сделавшим много в области химии и оптики. После эксперимента Эрстеда в 1820 году он, как и многие другие учёные, стал исследовать магнитные свойства тока. Волластон обвинил Фарадея в плагиате, что ухудшило его отношения с коллегами. В октябре 1821 года Фарадей встретился с Волластоном, что привело к их примирению. В 1825 году Дэви из-за болезни оставил руководство лабораторией Королевского института и рекомендовал на должность нового руководителя Фарадея.



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

В науке имеет ценность только то, что опубликовано. Если Вы получили интересные на Ваш взгляд результаты, обязательно публикуйте их хотя бы на конкурсах проектно-исследовательских работ школьников.

Если Вы использовали в работе чьи-то идеи, обязательно ссылайтесь на авторов. Это несколько не уменьшит Ваши достижения, но оградит Вас от обвинения в плагиате.

Фарадея можно считать образцовым экспериментатором. Современников удивляли его трудолюбие, методичность и аккуратность. Всю жизнь он вёл тетради с тщательным описанием экспериментов. Последний его эксперимент по электричеству имеет номер 16041. Благодаря его дневнику мы знаем, что уже в 1822 году он поставил цель превратить магнетизм в электричество. Но прошло долгих 9 лет, прежде чем он придумал, как

провести эксперимент. Нельзя сказать, что это время он потерял напрасно. Он открыл бензол, точнее, выделил его в чистом виде, получил в жидком виде хлор, сероводород... Только за эти достижения Фарадей вошел бы в любой учебник истории химии, но главный триумф его был впереди.

Благодаря тетрадам Фарадея, можно проследить, как он шёл к своему открытию *электромагнитной индукции*. На рис. 46 показана схема неудачного эксперимента. Вольтова батарея замыкается с помощью ключа. Рядом лежит второй контур. Логика рассуждения Фарадея понятна. Ток обладает магнитными свойствами. Если магнит может вызвать ток, то при замыкании ключа во втором контуре должен пойти ток, и мы обнаружим его по отклонению стрелки. Но при замыкании ключа стрелка не отклонялась. Как мы теперь понимаем сейчас, ток во втором контуре возникал, но он был слишком мал, чтобы отклонить стрелку компаса. Другой бы решил, что магнит не может вызвать электрический ток, и занялся чем-то другим. Но Фарадей правильно понял, что ему не хватает точности. Для увеличения чувствительности нужно было вместо одиночных витков взять катушки со многими витками.

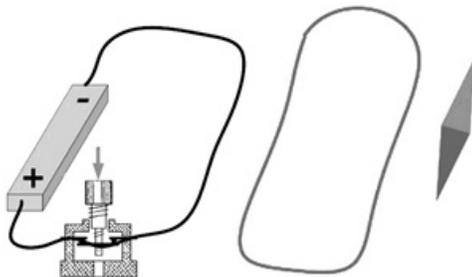


Рис. 46. Схема неудачного эксперимента Фарадея

В 1831 году Фарадей всё же добился своей цели. Благодаря скрупулёзным записям в его тетрадах мы знаем дату открытия явления электромагнитной индукции. 29 августа 1831 года Фарадей намотал на деревянную (то есть на не проводящую и не магнитную) катушку 203 фута (около 60 метров) проволоки, а сверху неё намотал 203 фута другой проволоки, как показано на рис. 47. Между проволоками для изоляции был помещён шнур, чтобы исключить электрический контакт. Одна проволока была замкнута на гальванометр, а вторая – на батарею из 100 пластин. При



Рис. 47. Схема первого эксперимента Фарадея

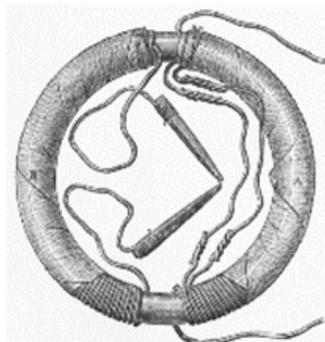


Рис. 48. Схема второго эксперимента Фарадея

напряжения в низкое, и наоборот. Получилось, что *Фарадей* случайно (в который раз случайно!) изобрёл трансформатор задолго до того, как в нём возникла потребность, и даже до того как научились получать переменный ток.

замыкании и размыкании ключа наблюдалось отклонение стрелки гальванометра.

Возможно, Вас удивит простота эксперимента Фарадея: проволока, батарейка и гальванометр. Но ведь гальванометры в то время в магазинах не продавали, их только-только придумали, и каждый экспериментатор должен был изготавливать гальванометры, да и вольтовые столбы самостоятельно. Проволоку с изоляцией тогда тоже никто не изготавливал. Представьте себе работу: намотать 60 метров провода, тщательно изолируя каждый виток, чтобы не было контакта, поверх намотать ещё проволоку... и, возможно, сделать это не раз и не два (не всегда всё получается с первого раза), не зная заранее, будет эффект или нет.

Вслед за первым экспериментом следует второй. Фарадей берёт железное кольцо и наматывает две проволоки, тщательно изолируя их от кольца и друг от друга, как показано на рис. 48. Снова одна проволока присоединяется к вольтову столбу, а вторая – к гальванометру. И снова при замыкании ключа по гальванометру течёт ток, причём уже гораздо более сильный.

Читатели, которые уже занимались конструированием схем, без труда узнают в этой конструкции *трансформатор*. Но ведь трансформатор используют для преобразования переменного тока: высокого

Но *Фарадей* не останавливается и 17 октября 1831 года проводит ещё эксперимент, который обычно и демонстрируют в школе. Схема эксперимента приведена на рис. 49. В своих записях *Фарадей* описал его так:

*Я взял цилиндрический магнитный брусок (3/4 дюйма в диаметре и 8 1/4 дюйма длиной) и ввёл один его конец внутрь спирали из медной проволоки (220 футов длиной), соединенной с гальванометром. Потом я быстрым движением толкнул магнит внутрь спирали на всю его длину, и стрелка гальванометра испытала толчок. Затем я так же быстро вытащил магнит из спирали, и стрелка опять качнулась, но в противоположную сторону. Эти качания стрелки повторялись всякий раз, как магнит вталкивался или выталкивался.*

24 ноября 1831 года *Фарадей* публикует свои результаты, выступая перед Королевским обществом. Уже после доклада выясняется, что американский физик *Джозеф Генри* (*Joseph Henry*; 1797 – 1878) уже проводил такой же эксперимент, но вместо постоянного магнита использовал катушку с током, как показано на рис. 50. Однако *Генри* не посчитал нужным опубликовать свои результаты. Это произошло по двум причинам. Во-первых, *Генри*, будучи «настоящим американцем», стремился видеть в своих изобретениях именно практическую пользу. Удивительно, но он не увидел практической значимости открытия, которое явилось самым важным достижением XIX века для развития электротехники. Во-вторых, *Генри* не мог теоретически обосновать свое открытие. Мы связываем открытие явления электромагнитной индукции с именем *Фарадея* не только потому, что *Фарадей* первым опубликовал результаты, но и потому что он дал теоретическое объяснение явлению, о чём подробнее речь впереди.

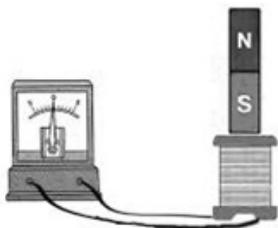


Рис. 49. Схема третьего эксперимента *Фарадея*

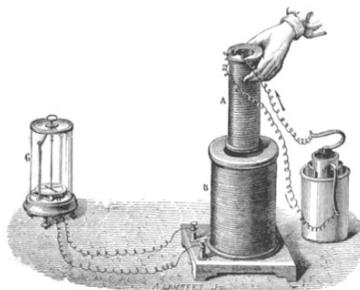


Рис. 50. Схема эксперимента *Генри*

Фарадей даёт, наконец, объяснение опытов Араго 1824 года с компасом и медным диском. Стрелка компаса, качаясь над диском, индуцировала в нём ток, а этот ток создавал магнитное поле, которое притягивало стрелку, замедляя её движение. Во втором опыте Араго стрелка компаса индуцировала ток во вращающемся диске, ток создавал магнитное поле, которое притягивало стрелку.

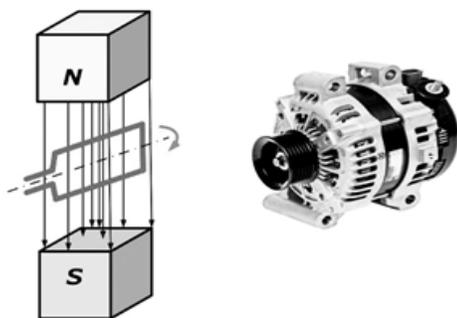
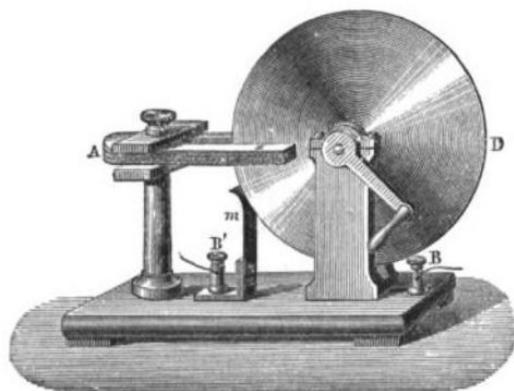
Основываясь на опыте Араго, Фарадей создаёт первый генератор электрического тока – диск Фарадея. Установка Фарадея изображена на рис. 51, сверху. Между полюсами сильного подковообразного постоянного магнита  $A$  вращается медный диск  $D$ . Электрический контакт  $B$  соединен с осью диска, а второй контакт  $B'$  – с пластиной  $m$ , которая прижимается к краю диска (скользящий контакт). При вращении диска между контактами возникает напряжение. Это был первый, пусть маломощный генератор тока (динамо-машина). Затем генераторы тока многократно модернизировали, в том числе и сам Фарадей.

Упрощённый вид современного генератора тока представлен на рис. 51, снизу. Он отличается от диска Фарадея тем, что вместо диска между полюсами магнита вращается металлическая рамка, по которой и течёт возникающий электрический ток. Заметим, что современные генераторы тока устроены сложнее, в них может размещаться несколько рамок, использоваться мощные электромагниты... и др. Но принцип от этого не меняется – изменение потока магнитного поля порождает электрический ток.

Появился новый способ получения электрического тока – намного более эффективный, чем химические батарейки. Тысячи работающих сегодня по всему миру генераторов тока в атомных, гидро- и тепловых электростанциях, миллионы генераторов в легковых автомобилях и др. обязаны своим происхождением открытию *электромагнитной индукции*.

Трудно переоценить значение открытия электромагнитной индукции. Представьте на минуту, что в мире единственным источником тока являются батарейки. Мы просто попадём в XIX век, причём в самое начало. Это жизнь без электрического освещения (в лучшем случае, карманные фонарики), без электропоездов, трамваев, метро... Не было бы компьютеров, телевизоров, радио, телефонов (сотовых и стационарных) и даже аккумуляторов, потому что для зарядки аккумуляторов нужны мощные генераторы тока. Мир был бы даже без двигателей внутреннего сгорания,

которые не могут работать без электрических свечей. И всё это (и многое другое) мы имеем, потому что кому-то было не лень мотать десятки метров провода, соединять металлические диски, крутить магниты и пр. Конечно, если бы Вольт не придумал вольтов столб, Эрстед не поставил бы рядом с проводом компас, Фарадей не намотал бы проволоку на катушку, то это сделали бы другие, может, чуть позже. Но всё же не может не поражать, что наша цивилизация имеет современное техническое благосостояние благодаря совсем небольшому (в процентном отношении) числу людей. Причём эти люди, которым впоследствии воздвигли памятники, при жизни зачастую не имели не только славы и почёта, но просто влачили нищенское существование.



*Рис. 51. Сверху – диск Фарадея, снизу – слева – упрощённая схема современного генератора тока, справа – генератор тока в собранном виде.*

В 1835 году Фарадей тяжело заболел. Через два года он смог вернуться к работе, но в 1840 году болезнь снова дала о себе знать (частичная потеря памяти и др.). После этого он мог работать только урывками, когда его ненадолго отпускала болезнь. Причина болезни Фарадея не очень понятна. Возможно, он отравился парами ртути, поскольку ртуть в те времена часто использовалась для улучшения электрических контактов между проводами. Больной учёный должен был владеть нищенское существование до выделения ему государственной пенсии в 1845 году.

Вклад *Фарадея* в науку не ограничивается открытием *электромагнитной индукции*. Он занялся проблемой: что же происходит в вольтовом столбе, зачем нужен раствор между пластинами? *Фарадей* исследует электролиз, то есть химические реакции под действием электрического тока. Электролиз уже был известен. Учитель *Фарадея* – Дэви разложил с помощью электролиза воду на кислород и водород. В то время это было чисто академическое открытие, но в наши дни оно имеет важнейшее практическое применение. В 1832-34 годах *Фарадей* открывает законы электролиза о которых речь впереди.



ЭТО ИНТЕРЕСНО

ЭЛЕКТРОЛИЗ И ПОДВОДНЫЕ ЛОДКИ

Одна из основных проблем подводных лодок – это ограниченный запас воздуха. Как же атомным подлодкам удаётся плавать под водой по полгода без всплытия? Оказывается, кислород можно получать из воды (благо, воды вокруг подлодки достаточно) электролизом. При приложении к воде напряжения она разлагается на кислород и водород. В обычных подлодках возможность использовать электролиз ограничена запасами электрической энергии, а атомные подлодки тем и хороши, что запаса ядерного топлива хватает надолго.

Мы привыкли считать, что *Фарадей* доказал взаимосвязь электрических и магнитных явлений. И это так. Но, как ни парадоксально это сегодня звучит, *Фарадей* ещё доказал взаимосвязь электрических явлений. К 1830-м годам было три вида электрических явлений: электростатика (электризация трением), химические (гальванические) батареи и термоэлектричество. В 1831 году *Фарадей* открыл электрические явления магнитного

происхождения. В то время серьёзно обсуждался вопрос: в этих явлениях одно и то же электричество или разные? Фарадей со свойственной ему скрупулёзностью провёл многочисленные эксперименты и показал, что все четыре «электричества» одинаковы по своим химическим свойствам (электролизу), воздействию на гальванометр... и т.д.

Фарадей был не только великим учёным, но и талантливым популяризатором науки. Он умел сочетать наглядность и доступность с глубиной рассмотрения предмета. Его научно-популярная книга для детей «История свечи» (популярные лекции, 1861 год) издаётся до сих пор!

### **ИТОГИ III ГЛАВЫ**

К середине 1830-х годов благодаря усилиям многих учёных, среди которых, конечно, выделяется имя Майкла Фарадея, была установлена взаимосвязь многочисленных электрических и магнитных явлений. Открытие явления электромагнитной индукции, возможность производить и использовать электроэнергию стало важным этапом в развитии техники того времени. Однако дальнейшее развитие науки и техники тормозило отсутствие теории электромагнетизма, способной описать экспериментальные данные. И в создание этой теории большой вклад внёс также Майкл Фарадей.

## ГЛАВА. 4. ВИДЕНИЕ МИРА ЧЕРЕЗ МАГИЧЕСКИЙ КРИСТАЛЛ ГИПОТЕЗ

*И даль свободного романа  
Я сквозь магический кристалл  
Ещё не ясно различал.*

*А.С. Пушкин «Евгений Онегин», глава VIII*

*– Во поле берёзонька стояла,  
Во поле кудрявая стояла...  
– В каком поле она стояла?  
– В гравитационном...*

*(из анекдота)*

Иногда кажется, что развитие науки шло следующим образом: имелось большое число людей, которые проходили мимо очевидных фактов, «в упор» не замечая, что мир поставлен «с головы на ноги», а затем появлялся «нормальный» человек, который всё ставил на свои места. Например, кажется странным, что только великий английский физик Исаак Ньютон (*Isaac Newton*, 1643 – 1727) заметил, что Земля притягивает тела, а до того много веков и тысяч лет никто не замечал земного притяжения.

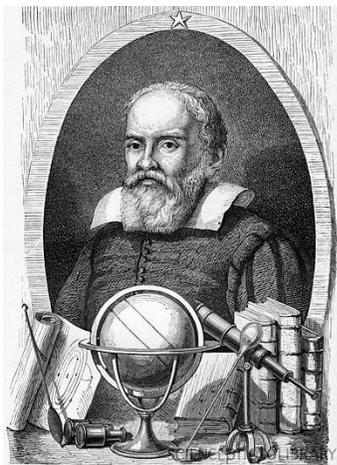
Дело в том, что люди смотрят на мир, соотнося увиденное с привычной картиной мира. Это можно сравнить со взглядом через цветные очки или «магический кристалл». Через розовые очки весь мир будет в розовом цвете, через зелёные – в зелёном. Каждый исследователь мыслит в рамках общепринятой картины мира, и только великие умы способны создать новую картину мира. Конечно, учёные и до Ньютона видели, что тела падают на землю, но в общепризнанной тогда картине мира, созданной Аристотелем в IV веке до н.э., считалось, что все тяжёлые тела имеют «естественное стремление» к Центру мира (который по представлениям Аристотеля совпадал с центром Земли). Про силу притяжения никто не упоминал, поскольку первое объяснение казалось достаточным. Не следует думать, что Аристотель был глуп. Аристотель сделал очень важный и решительный для своего времени шаг. Он отделил науку от магии и мистики, которые в то время процветали. Он считал, что «незримые сущности» удел магии, а не науки, потому о какой-то невидимой силе притяжения, действующей на расстоянии, никто из учёных, мыслящих в

рамках представлений физики Аристотеля не помышлял.

Ньютон потому и считается величайшим мыслителем в истории человечества, что он по-новому взглянул на мир. Он выдвинул гипотезу, что тела способны притягиваться на расстоянии, что Земля может притягивать не только камни, но Луну и другие тела. До Ньютона считалось, что есть два совершенно разных мира: мир подлунный (Земля и всё что на ней) и мир небесный. Согласно этому воззрению Луна, Солнце, планеты, звёзды являются «эфирными» телами, которые вечны, неразрушимы и не имеют «ни тяжести, ни лёгкости». Эта установка на два мира приводила к забавным «логическим выводам».

Так великий итальянский учёный Галилео Галилей (*Galileo Galilei*; 1564 – 1642) в написанном им «Диалоге о двух главных системах мира Птолемеевой и Коперника» (за который Галилея чуть не сожгла инквизиция) задаётся вопросом: кометы являются земными телами или небесными? Вы как думаете? А Галилей твёрдо уверен, что кометы – земные тела. А обоснование? Современному человеку трудно догадаться до хода мысли Галилея. Он мыслил в рамках картины мира Аристотеля: небесные тела – вечны и неизменны, а кометы то появляются, то исчезают. Следовательно, кометы не небесные тела, а – земные. А раз они так высоко летают, значит – они очень лёгкие. Логично? Логично, если жить в картине мира Аристотеля.

Своё новое видение мира Ньютон изложил в книге «Математические начала натуральной философии», которая вышла в 1687 году. Его взгляд на мир не был сразу принят научным миром. Важно понимать, что Ньютон не доказывал наличие всемирного тяготения, как теорему. Новое видение мира было непривычно, но оно вытеснило старое, потому что было *продуктивно*. Законы Ньютона позволяли сделать то, что нельзя было сделать, исходя из установок Аристотеля. Основываясь на гипотезе существования всемирного тяготения, Ньютон рассчитал движение планет и даже комет, объяснил происхождение приливов и отливов и др.



Галилео Галилей  
(1564 – 1642)

Физика – очень протяжённая наука. С одного края она упирается в фундаментальные вопросы мироздания: возникновения и строения Вселенной. С другого конца она является основой для технических приложений. Сегодня, да и уже в XVIII веке практические приложения интересуют людей больше, чем великие теории. Как бы ни были красивы умозаключения, если они бесполезны для практики, то они умирают или остаются уделом немногих теоретиков. Можно долго рассуждать являются кометы небесными или земными телами. Гораздо важнее уметь вычислять положение тел на небе. Морская навигация – это практическое приложение астрономии. Важность этого (в отсутствии спутников) даже не нужно пояснять.

Успехи механики Ньютона побудили учёных искать механические основы во всех известных явлениях природы. Через 100 лет после Ньютона, в 1783 году великий французский учёный, основатель химии (в её современном представлении) Антуан Лоран Лавуазье (*Antoine Laurent de Lavoisier*; 1743 – 1794) выдвинул гипотезу существования *теплорода* – особой невесомой жидкости (флюида), которая является причиной тепловых явлений.

Гипотеза существования теплорода была вначале плодотворной, поскольку позволяла объяснить известные к тому времени явления. Смотри на мир через «магический кристалл» теплорода, можно было обосновать уравнение теплового баланса, явления плавления, испарения, теплопроводности и др.



*Антуан Лоран Лавуазье  
(1743 – 1794)*

Однако со временем стали накапливаться данные, не укладывающиеся в представление о теплороде. Например, было замечено, что при сверлении жерл пушек, они сильно нагревались. То, что туземцы уже тысячи лет добывали огонь трением, также было известно, но этот факт не имел практического значения, тем более, что его можно было объяснить, придумав передачу теплорода от человека к трущимся палочкам. Другое дело – производство пушек. Здесь количество выделяемого «теплорода» было столь велико (особенно, если свёрла тупые), что было неясно, откуда он мог появиться, а практическое

значение пушек объяснять не приходится.

В 1799 г. учитель Фарадея Гемфри Дэви (ему тогда было всего 17 лет) поставил эксперимент. Он поместил два куска льда в сосуд и откачал из него воздух. Затем куски тёрлись друг о друга при помощи специального механизма. При трении лёд таял, что нельзя было объяснить в рамках теории теплорода.

Накопление подобных экспериментов привело к тому, что в середине XIX века использование представлений о теплороде перестало быть плодотворным, и теплород уступил место молекулярно-кинетической теории, которой мы пользуемся и в наши дни.

Представление об электричестве, как об особой жидкости («флюиде») в XVIII веке тоже было плодотворным. Используя это понятие, Франклин изобрёл молниеотвод, Кулон открыл закон взаимодействия зарядов. Представление об электрической жидкости прочно вошло в научную терминологию. Мы и сегодня говорим, что электрические заряды *стекают*, электрический ток *течёт*... Традиционно при изучении электричества в школе принцип работы цепи с ЭДС (электродвижущей силой) поясняют, проводя параллель с насосом и протеканием воды по трубам.

Но время шло, появлялись новые данные. Открытие электромагнитной индукции потребовало полной смены представлений о природе электричества и магнетизма. Вклад Фарадея в науку заключается не только в открытых им явлениях, но и в создании принципиально нового подхода к их описанию.

Блестящий экспериментатор Фарадей так и не получил цельного образования, и не смог выразить свои идеи на языке математики.

Неумение описать электромагнитные явления математически сыграло *положительную* роль. Фарадей придумал, как наглядно *изобразить* электромагнитные взаимодействия в виде *силовых линий*.

Для изображения силовых линий нужно соблюдать следующие *правила*:

- 1) касательная к магнитной силовой линии показывает положение стрелки компаса; касательная к электрической силовой линии показывает направление силы, действующей на положительный точечный заряд;
- 2) магнитные силовые линии замкнуты, электрические силовые линии начинаются и заканчиваются либо на зарядах, либо уходят в бесконечность;

3) чем сильнее действие магнитных или электрических сил, тем гуще изображаются линии.

Представление о силовых линиях позволило Фарадею количественно выразить явление электромагнитной индукции. Он выдвинул гипотезу, что сила тока будет пропорциональна изменению числа магнитных силовых линий, пронизывающих контур. Гипотеза оказалась плодотворной и позволила получить количественное выражение для ЭДС – закон электромагнитной индукции.

На рис. 18 были показаны силовые линии электрического поля конца иглы. На рис. 52 изображены силовые линии двух электрических зарядов, а на рис. 53 – силовые линии постоянного магнита (слева) и проводника с током (справа).

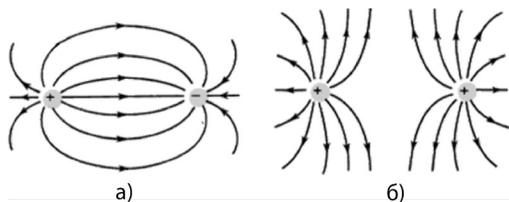


Рис. 52. Силовые линии двух электрических зарядов: а) разноимённых, б) одноимённых.

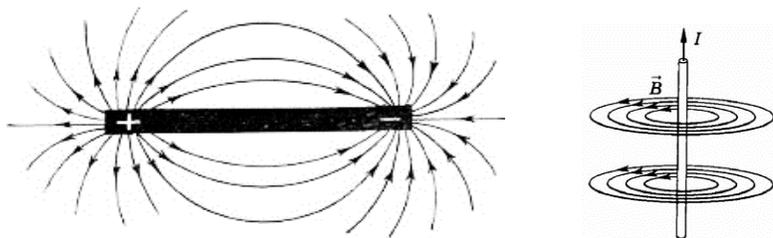


Рис. 53. Силовые линии постоянного магнита (слева) и проводника с током (справа).

Само понятие силовых линий не вызвало неприятия научного сообщества. Силовые линии несложно наблюдать. Для этого нужно насыпать на горизонтальный лист бумаги немного железных опилок, поднести снизу магнит и опилки выстроятся вдоль силовых линий, как показано на рис.

54 (для лучшего качества картинки по листу нужно немного постучать, чтобы опилки могли преодолеть силу трения).

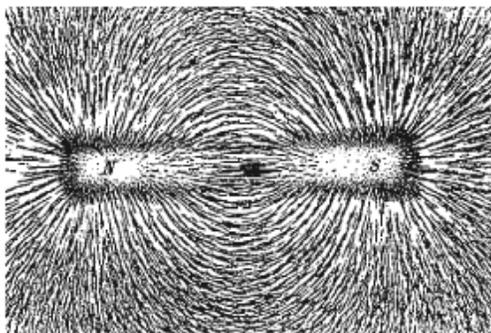


Рис. 54. Железные опилки выстраиваются вдоль магнитных силовых линий.

Но Фарадей идёт дальше. Для него силовые линии – не просто математический приём, а новая физическая реальность. В 1845 году Фарадей вводит в физику понятие *поля*.

Чтобы понять революционность идей Фарадея нужно вспомнить, что до Фарадея считалось, что электрические и магнитные тела взаимодействуют на расстоянии. И Кулон, и Эрстед, и др. учёные были уверены, что электрические заряды, магниты, электрический ток и компас взаимодействуют на расстоянии. Это – теория *дальнодействия*, берущая своё начало от Ньютоновской идеи взаимодействия планет (и других тел) на расстоянии. Фарадей выдвинул гипотезу *близкодействия*, по которой каждый электрический заряд и каждый магнит создаёт особый материальный посредник – электрическое или магнитное поле, и именно это поле взаимодействует с другими зарядами.

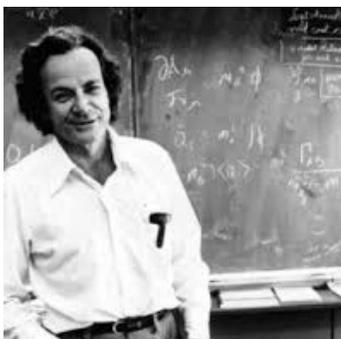
Современники встретили идею Фарадея о поле, мягко говоря, прохладно. Неприятию понятия поля способствовало то, что Фарадей не дал математического описания. Это сделал в 1861 году великий английский физик – теоретик Джеймс Клерк Максвелл (*James Clerk Maxwell*, 1831 – 1879).

Что такое поле? Ответить на этот вопрос непросто, проще ответить на вопрос, чем оно не является. Это не жидкость и не газ, оно невидимо, не слышимо, мы можем спокойно пройти через него, вокруг нас всюду элек-

трические, магнитные и, конечно, гравитационные поля...

Сейчас мы слышим про электромагнитные, гравитационные поля каждый день в школе, по телевизору, интернету... и не то чтобы поняли, что такое поле, а, скорее привыкли к нему.

Американский физик и лауреат Нобелевской премии (1965) Ричард Филлипс Фейнман (*Richard Phillips Feynman*, 1918 – 1988) сказал, что учёные долгое время пытались объяснить электромагнитное поле при помощи различных механических моделей, но потом оставили эту затею и сочли, что физический смысл имеет лишь описывающая поле система уравнений Максвелла.



*Ричард Филлипс Фейнман  
(1918 – 1988)*

Максвелл отказался от электрической жидкости, но использовал понятие *эфира* – особого упругого вещества, заполняющего всё пространство. Благодаря взгляду через «магический кристалл» эфира Максвеллу удалось математически описать все известные явления электричества, магнетизма и их взаимные превращения. Максвелл на кончике пера вывел возможность возникновения электромагнитных волн и даже рассчитал, что они должны распространяться со скоростью света!

Фарадей, узнав о работах Максвелла, дал им высокую оценку:

*Я поначалу испугался, увидев, какая мощная сила математики приложена к предмету, а затем удивился тому, насколько хорошо предмет её выдержал...*

Уже после смерти Максвелла немецкий физик Генрих Рудольф Герц (*Heinrich Rudolf Hertz*, 1857 – 1894) смог эти волны экспериментально получить, что будет рассмотрено ниже. Только после того как электромагнитные волны стали реальностью, физики приняли понятие поля, как единственный способ их описать.

Служат ли успехи Максвелла доказательством существования эфира?

После Максвелла были предприняты многочисленные попытки определить скорость движения Земли относительно эфира, которые ни к чему не

привели. Со временем появились данные, не вписывающиеся в представления об эфире. Нельзя сказать, что кто-то доказал, что эфира не существует. Просто взгляд через «магический кристалл» эфира перестал быть эффективным, и научное сообщество перестало его использовать.

Не уйдёт ли вслед за электрическим флюидом и эфиром понятие электромагнитного поля?

Представление об электромагнитном поле претерпело серьёзное переосмысление после появления квантовой теории. В середине XX века возникла новая наука – квантовая электродинамика, её создатели Ричард Фейнман, Синъитиро Томонага (1906 – 1979) и Джулиан Швингер (*Julian Schwinger*, 1918 – 1994) были в 1965 году удостоены Нобелевской премии.

Физика – наука экспериментальная, и любой «магический кристалл» будет использоваться, пока это будет продуктивно для объяснения открытых явлений и предсказания новых. Если появятся эксперименты, которые нельзя будет объяснить в рамках старых теорий, то придётся создавать новые.

## ЭЛЕКТРОЛИЗ

Вернёмся к 1831 году. После открытия электромагнитной индукции Фарадей занялся исследованием электролиза. Сейчас даже сложно представить все проблемы, с которыми пришлось столкнуться Фарадею. Это и технические сложности: у него были только самодельные гальванометры, лейденские банки, электроскопы, вольтовы столбы и т.п. Это и малая изученность предмета: считалось, что электролиз свойственен только воде и её растворам, что он происходит в силу того, что частицы веществ притягиваются электродами... и т.п.

В 1832-34 годах Фарадей открывает законы электролиза. С высоты нашего времени, когда мы знаем, что все тела состоят из атомов и молекул, эти законы выглядят почти очевидными. Но во времена, когда электричество представлялось в виде загадочного флюида, связь между количеством флюида и массой прореагировавших веществ ещё требовалось обнаружить.

Фарадей проводит множество экспериментов. Он получает, что массы

осаждённых на электродах веществ не зависят от напряжения, а только от перенесённого заряда. Он находит, что это заключение справедливо для любого электролита: соли, щелочи или кислоты. Фарадей проводит опыты с хлористым свинцом, хлористым серебром и др. веществами, которые не проводят электрический ток при комнатных температурах, но при высоких температурах они плавятся, проводят ток и под действием тока разлагаются. Таким образом, Фарадей открывает, что электролиз возможен не только у водных растворов, но и у расплавов.

В результате Фарадей формулирует два закона. Приведём их в современных терминах.

Первый закон: масса осаждённого на электродах вещества пропорциональна прошедшему заряду.

Второй закон: масса осаждённого на электродах вещества пропорциональна его молярной массе, делённой на валентность. (Если читатели ещё не изучали химию, и им незнакомо понятие валентности, то, не вдаваясь в подробности, можно считать валентность просто химическим свойством вещества.)

Законы Фарадея укрепили молекулярную теорию. Нужно иметь в виду, что понятие моля войдёт в обиход химиков только в конце XIX века. Правда, великий итальянский химик Амедео Авогадро (*Amedeo Avogadro*, 1776 – 1856) уже в 1811 году сформулировал свой закон равенства числа молекул в газах при одинаковых условиях, но этот закон в то время был отвергнут многими видными химиками.

Фарадей не просто открыл новые закономерности электролиза. Он отверг представления об электрических флюидах и посмотрел на явления электролиза через «магический кристалл» молекулярного строения вещества. Фарадей пришёл к заключению, что носителями электрических



*Амедео Авогадро*  
(1776 – 1856)

сил являются частицы вещества. Он ввёл используемые сегодня понятия: *ион, катион, анион, электролит, катод, анод...*, предположил, что существует частица с наименьшим зарядом, и вплотную подошёл к представлению о строении атома. Фарадей не стал фантазировать, как может быть устроен атом, чтобы не сойти с твёрдой почвы экспериментальных дан-

ных. Но он измерил, переводя на современный язык, что для выделения на электроде одного моля вещества нужно к его ионам подвести (или отвести) заряд в 96 484 кулона. Это число сейчас называется постоянной Фарадея.

Рассмотрение процессов электролиза как распад (диссоциацию) молекул на положительно заряженные катионы и отрицательно заряженные анионы оказалось очень плодотворным и позволило понять принципы работы химических источников тока.



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Далее излагаются принципы работы батареек и аккумуляторов. Если читателям, не изучавшим химию, материал покажется слишком сложным, текст до конца главы можно пропустить без ущерба для понимания последующих глав.

## БАТАРЕЙКИ

Рассмотрим через «магический кристалл» молекулярной теории принцип работы гальванического элемента, созданного Вольтой. Для большей наглядности представим его в виде двух электродов, погружённых в сосуд, разделённый на две части пористой мембраной, как показано на рис. 55. Через мембрану вода может проходить, но медленно, перемешивания раствора не происходит. У Вольты такой мембраной служил кусок сукна, смоченный кислотой. Налёв в сосуд раствор разведённой (не концентрированной) серной кислоты. Её химическое обозначение:  $H_2SO_4$ . Это означает, что молекула серной кислоты может разложиться на два иона водорода ( $H^+$ ), имеющих по одному положительному элементарному заряду и ион сульфата, имеющий удвоенный отрицательный элементарный заряд. Это можно записать в виде формулы:



Медный и цинковый электроды будут постепенно растворяться в кислоте, пока не образуется насыщенный раствор. Заметим, что раствор сульфата меди ( $CuSO_4$ ) называется медным купоросом. В результате слева образуются положительно заряженные ионы цинка ( $Zn^{2+}$ ), а справа – ионы

меди ( $\text{Cu}^{2+}$ ).

Для того, чтобы оторвать ион от цинка и ион от меди требуется затратить разное количество энергии. Точное значение зависит не только от материала, но и от концентрации ионов. Соединим электроды проволочкой, и рассмотрим, что будет, если от медного электрода к цинковому будет двигаться электрон (направление тока в обратную сторону), как показано на рис. 55.

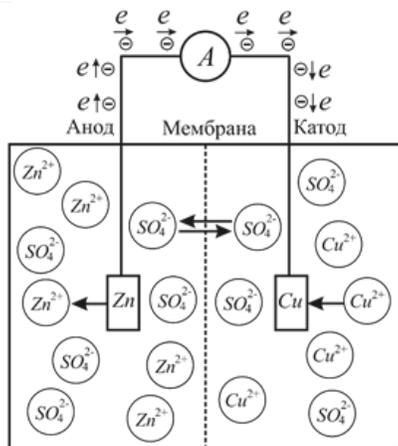
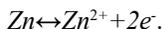
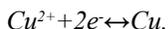


Рис. 55. Гальванический элемент

Откуда может взяться избыток электронов? На цинковом электроде молекулы цинка становятся ионами и переходят в раствор, а освобождающиеся электроны будут поступать в электрическую цепь между анодом и катодом:



Электроны, достигнув медного катода, соединяются с ионами меди, в результате медь осаждается на электроде:



Если бы энергия перехода иона цинка в раствор на аноде была бы равна энергии восстановления иона меди на катоде, то переход электрона не сопровождался бы совершением работы. Но (при равных концентрациях растворов меди и цинка) при растворении одного иона цинка и восста-

новления одного иона меди разница энергии составляет примерно один электрон-вольт. То есть, перенос электрона сопровождается высвобождением энергии, и в такой системе между электродами появляется напряжение примерно один вольт.

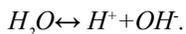
Если бы пористой мембраны не было, то в правой половине сосуда образовался бы отрицательный заряд, а в левой – положительный, что препятствовало бы движению электронов, и ток прекратился бы ещё до того, как мы его заметили. Но в системе есть ещё анионы сульфата ( $SO_4^{2-}$ ), которые будут медленно перемещаться (диффундировать) через мембрану, и восстановят электронейтральность частей раствора. Скорость диффузии анионов определяет максимальный ток, который может вырабатывать батарейка. Если скорость диффузии мала, то ток быстро прекратится. Если мембрана слишком легко пропускает водный раствор, то произойдёт перемешивание и батарейка не будет работать. Именно необходимость ограниченной диффузии – самое сложное в понимании устройства батарейки. Сегодня обычно вместо растворов с пористой мембраной используют густые гели.

Постепенно весь цинк перейдёт в раствор, а медь восстановится на электроде. После того, как цинк истощается, батарейка перестает работать. Заметим, что батарейки нельзя выбрасывать в обычный мусор. Это засоряет окружающую среду. Батарейки нужно сдавать на специальные пункты переработки.

А нельзя ли батарейки перезаряжать? Можно подключить её к источнику внешнего напряжения, чтобы цинк снова осел на анод, а медь перешла в раствор?

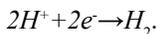
Этого ни в коем случае делать нельзя! Если подключить батарейку ко внешнему источнику питания, то на аноде будет восстанавливаться не цинк, а водород!

Выше была разобрана упрощенная схема работы батарейки. На самом деле молекула воды тоже распадается на катион и анион:



Молекулы воды распадаются плохо, поэтому ионов воды в миллионы раз меньше, чем ионов насыщенного раствора сульфата меди. Но если включить внешний источник «навстречу» батарейке, то ионы водорода будут восстанавливаться на положительном (цинковом) электроде с образова-

нием газообразного водорода:



Выделение водорода опасно! При соединении водорода с кислородом воздуха происходит выделение тепла и даже может произойти взрыв!

Полезно иногда читать инструкцию по эксплуатации. Там часто пишут, что не стоит включать вместе старую и новую батарейки. А это ещё почему? Потому что свежая батарейка может стать источником тока для старой, и в старой начнёт выделяться водород.

А может ли выделяться водород на медном электроде? Экспериментально установлено, что на положительном аноде будет в первую очередь из раствора восстанавливаться золото (из раствора золота), серебро (из раствора серебра), медь (из раствора меди) и др., но не водород. С другой стороны, из растворов цинка, алюминия, железа и др. будет восстанавливаться водород. Впрочем, реакции электролиза зависят ещё и от концентрации ионов.

Сегодня существуют разные типы батареек. Электролитом могут служить кислота, щелочь или солевой раствор. Разбирать батарейки не следует. Кислота или щелочь опасны!



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

При работе с батарейками соблюдайте осторожность! Не допускайте короткого замыкания батареек. Не пытайтесь перезарядить батарейки! Не разбирайте их! Следите, чтобы они не перегревались! Не используйте вместе свежие и сильно разряженные батарейки! Если Вы долго не используете прибор, батарейки лучше вынуть. Не выбрасывайте их в общий мусор! Сдавайте на переработку!

## АККУМУЛЯТОРЫ

Существуют батарейки, которые можно перезаряжать – аккумуляторы. Начиная с Вольты многие учёные экспериментировали с электродами из разных материалов. Уже в 1803 году немецкий физик Иоганн Вильгельм

Риттер (*Johann Wilhelm Ritter*, 1776 – 1810) собрал батарею только из медных кружочков, между которыми было помещено влажное сукно. После пропускания через эту батарею тока от вольтова столба она сама ненадолго становилась источником электричества. Но эффект был слабым, кроме того не имело смысла расходовать энергию одного химического источника, чтобы зарядить другой. Создание аккумуляторов стало актуальным после открытия Фарадеем явления электромагнитной индукции и создания генераторов тока, которыми можно было заряжать аккумуляторы. Из огромного множества видов аккумуляторов рассмотрим два: свинцовый – первый аккумулятор, получивший промышленное применение, и литий-ионный – наиболее часто используемый в современной электронной технике.

Заметим, что любые аккумуляторы имеют ограниченное число циклов перезарядки. Это связано с механическим разрушением электродов, и с выпадением в осадок (кристаллизацией) электролита, и с наличием дополнительных химических реакций, в том числе, электроды со временем окисляются.

## СВИНЦОВЫЙ АККУМУЛЯТОР

Свинцовый аккумулятор был изобретён в середине XIX века и используется и в наше время. Его история начинается в 1854 году, когда немецкий врач Вильгельм Йозеф Зинстеден (1803 – 1891) пропускал ток через погруженные в слабую серную кислоту свинцовые электроды. Он наблюдал интересное явление: катод покрывался двуокисью свинца ( $PbO_2$ ). Если затем источник отсоединяли и замыкали пластины, то появлялся ток, который протекал, пока двуокись свинца не растворялась в кислоте. Но Зинстеден не был готов увидеть новое, и не обратил внимание на обнаруженное явление.

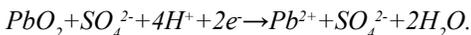
Только через пять лет, в 1859 году, французский физик Гастон Планте (*Gaston Plante*, 1834 – 1889) случайно (!) сделал то же самое наблюдение. Но он понял, как этот эффект можно использовать,



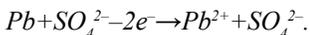
*Гастон Планте*  
(1834 – 1889)

и построил свинцовый аккумулятор.

При работе аккумулятора на катоде происходит растворение окиси свинца:

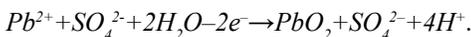


На аноде растворяется свинец:

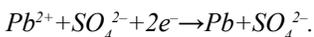


При зарядке аккумулятора реакции протекают в обратном порядке.

На катоде образуется окись свинца:



На аноде восстанавливается свинец:



При зарядке аккумулятора требуется осторожность: когда сульфат свинца истощается, начинается электролиз воды, т.е. выделяется водород! Поэтому свинцовые аккумуляторы нельзя заряжать слишком сильно! В свинцовых аккумуляторах находится серная кислота! Они требуют бережного обращения!

Сегодня свинцовые аккумуляторы используются в автомобилях, тракторах и пр., поскольку они допускают большое число циклов перезарядки и позволяют получить сильный ток, который необходим для запуска двигателей.



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

При работе со свинцовыми аккумуляторами соблюдайте осторожность, внутри находится серная кислота! Следуйте инструкции по эксплуатации! Не переохлаждайте разряженные аккумуляторы, при низкой концентрации серной кислоты может образоваться лёд, который необратимо повредит свинцовые пластины! Не допускайте понижения уровня электролита за счёт испарения, протекания через крышку при тряске и пр. Доливать в аккумулятор можно только дистиллированную воду (если аккумулятор вообще допускает самостоятельное обслуживание).

## ЛИТИЙ-ИОННЫЙ АККУМУЛЯТОР

Литий-ионный аккумулятор был создан относительно недавно. Его разработка представляет собой «долгострой» в области электроники. Еще в 1970-х годах английский инженер Стэнли Уиттингэм (*Stanley Whittingham*, род. 1941) из компании *Exxon* разрабатывал аккумуляторы на основе лития. Аккумулятор он сделал, но, к сожалению, аккумулятор имел недостаток – он выделял сероводород, что могло привести к взрыву. Нужно учесть, что литий – очень химически активный элемент и горит в воздухе при комнатной температуре, т.е. ни нагрев ни спички для него не нужны. Поэтому необходимо было исключить контакт лития с воздухом.

В конце 1970-х годов разработкой литиевых аккумуляторов занялся американский инженер Джон Гуденаф (*John Goodenough*, род. 1922). Он попытался использовать литий с сульфитами, что закончилось взрывом печи и пожаром в лаборатории...

Только в 1991 году фирма Sony выпустила относительно безопасный литий-ионный аккумулятор. В результате многолетних работ по обеспечению безопасности получилась довольно сложная конструкция. Её устройство показано на рис. 56.

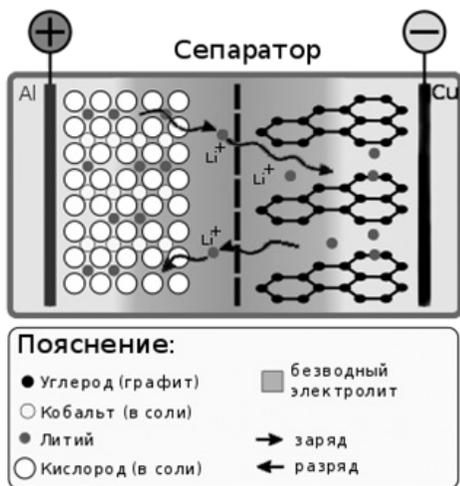


Рис. 56. Устройство литий-ионного аккумулятора

Переносчиком заряда в литий-ионных аккумуляторах является положительно заряженный ион лития ( $Li^+$ ), который обладает способностью внедряться в кристаллическую решётку других материалов: графит, оксиды и соли металлов. В качестве катода и анода используются алюминий и медь. Между ними расположен пористый материал с электролитом. Со стороны анода аккумулятор заполняется графитом, со стороны катода – солями лития на основе оксида кобальта ( $Li_xCoO_2$ ), оксида марганца ( $Li_xMn_2O_4$ ) или фосфата железа ( $Li_xFePO_4$ ). Индекс  $x$  означает, что число встроившихся ионов лития может быть различно. При заряде ионы лития переходят в графит, а при работе ионы лития возвращаются к солям металлов.

Литий-ионные аккумуляторы позволяют получать до 4,2 В на одном элементе.

Основными преимуществами литий-ионных аккумуляторов являются высокая ёмкость при малых размерах и большое число циклов перезарядки. Благодаря этому их сейчас широко применяют в ноутбуках, смартфонах, фотокамерах и др. электронной технике.

Основными недостатками являются их высокая огнеопасность и даже взрывоопасность. Аккумуляторы, рассчитанные на малые силы тока (маркировка *ICR*) нельзя использовать в устройствах, где возможна большая сила тока – это может привести к перегреву и возгоранию аккумуляторов.

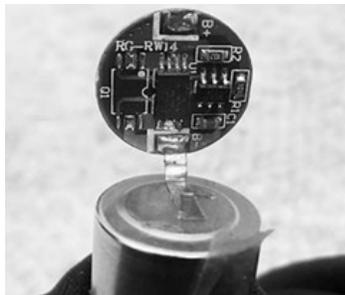
Проблема горения усугубляется тем, что при взаимодействии лития с водой образуется водород – горючий газ. Поэтому тушить литиевые аккумуляторы водой не всегда эффективно.

Другим недостатком литий-ионных аккумуляторов является то, что при сильном разряде они выходят из строя. Также их нельзя заряжать от слишком сильного источника – это сокращает срок их службы. Нельзя заряжать их при температурах ниже 4°C. Кроме того, литий-ионные аккумуляторы стареют и заметно теряют ёмкость в течение 2-3 лет даже если не используются.

Проблемы с перезарядкой решаются тем, что практически во все литий-ионные аккумуляторы встраиваются платы защиты. На рис. 57 показана такая плата, припаянная к аккумулятору и частично демонтированная, чтобы её можно было увидеть. Плата не позволяет слишком сильно зарядить или разрядить аккумулятор, контролирует величину тока и тем-

пературу.

Несмотря на используемые защиты литий-ионные аккумуляторы остаются огнеопасными. Были отмечены случаи самовозгораний смартфонов *Samsung Galaxy Note 7*, в которых оболочка была недостаточна надёжна, внутрь аккумулятора проникал воздух и смартфон вспыхивал. Многие авиакомпании ввели ограничения на перевоз литий-ионных аккумуляторов.



*Рис. 57. Защитная плата литий-ионного аккумулятора*



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

При работе с литий-ионными аккумуляторами соблюдайте осторожность! Следуйте инструкции по эксплуатации! Не разбирайте их, не допускайте повреждение оболочки! Помните, литий самовозгорается на воздухе! В случае возгорания используйте, по возможности, углекислотные огнетушители!

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ К IV-ОЙ ГЛАВЕ

Благодаря открытию закона электромагнитной индукции в физике появилось понятие поля, были предсказаны, а затем экспериментально открыты электромагнитные волны, появились радио, телевидение, радиолокаторы и др.

Благодаря открытию законов электролиза продолжила развиваться электрохимия, что привело к созданию батареек, аккумуляторов и др.

До сих пор мы больше обращали внимание на качества, которыми должен обладать исследователь, чтобы делать научные открытия. Сейчас мы перейдём к рассмотрению качеств изобретателей, которые помогают внедрять научные открытия в производство.

## ГЛАВА. 5. ТЕРНИСТЫЙ ПУТЬ НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА: ТУПИКИ И ПОВОРОТЫ

Правильный путь таков: усвой то, что сделали твои предшественники, и иди дальше.

*Лев Николаевич Толстой*

Путь технического развития редко идёт по прямой. Конечно, было бы хорошо, чтобы одно научное открытие или изобретение следовало бы за другим, в результате чего возникали бы стройные теории или технические устройства. Обычно над любой проблемой работает множество людей, каждый исследователь движется в своем направлении, и не всегда ясно, какие идеи окажутся полезными и «сверхполезными», а какие ведут в тупик. Появляются разнообразные изобретения, многие из которых не выдерживают проверку временем. В каком-то смысле можно сказать, что идеи изобретателей ведут Дарвиновскую борьбу за выживание, за право быть использованными людьми. Кроме того, путь прогресса таков, что многие изобретения вначале честно служат интересам людей, а затем оказываются безнадежно устаревшими.

Если бы Вы сейчас попали в Петербург XIX века, то обнаружили бы, что основными видами городского транспорта были извозчики и конка. Слово «извозчик», скорее всего, хорошо знакомо: это лошадь с упряжкой – такси XIX века. Но что такое «конка»? Конка тоже использовала лошадиную силу, но только лошади (обычно парами) тянули повозку не



*Рис. 58. Конка – городской транспорт XIX века*

по неровной булыжной мостовой или по земляному грунту, а по рельсам (рис. 58). Благодаря тому, что рельсы гладкие, тянуть повозку по ним намного легче, чем по грунту, и пара лошадей могла перевозить вагон с десятками пассажиров – намного больше, чем извозчики.

В свое время конка была символом прогресса городского транспорта, теперь слово «конка» мало кто знает. Но с другой стороны, в технике ничто не пропадает

совсем бесследно. В начале XX века (всего 100 лет назад) конку сменил трамвай: по таким же рельсам поехал «самодвижущийся» вагончик, который толкала уже не пара лошадей, а сила электричества. Началась эра трамваев. Трамваи ездили намного быстрее конки. Но это достоинство трамваев стало их недостатком. Быстрые, но громыхающие трамваи постепенно вытесняются более тихими троллейбусами и электробусами, которые движутся на резиновых шинах... В больших городах неповоротливые трамваи ушли под землю – появилось метро. И кто возьмётся предсказать, каким будет городской транспорт через сто лет?

Другой пример. Возможно, Вы знаете, что изобретение Джеймсом Уаттом (*James Watt*, 1736 – 1819) в конце XVIII века паровой машины стало историческим прорывом в развитии техники. Многочисленные изобретатели придумали, как поставить паровую машину на корабли (преодолев при этом множество технических сложностей) – появились пароходы. В начале XIX века паровую машину поставили на рельсы – появились паровозы. Весь XIX век и начало XX века – это эпоха паровых двигателей. Но в конце XIX века изобрели двигатель внутреннего сгорания, дизель – и паровозы постепенно были вытеснены более удобными и экономичными тепловозами, а затем и электровозами. Теперь паровозы можно увидеть только в старых фильмах и музеях. Но их след остался: тепловозы и электровозы ездят по тем же рельсам и унаследовали строение колёс паровозов.



*Рис. 59. Паровоз*

Можно провести множество подобных примеров. В развитии электроники тоже было много интересных, в своё время очень полезных, но уже безнадежно устаревших изобретений. Мы не будем рассказывать про вакуумные радиолампы, телефоны с вращающимися дисками для набора

номера, кассетные видеомэгнофоны и многое другое. Их ещё можно иногда встретить, но всё же лучше сфокусировать своё внимание на современных и перспективных изобретениях, которые встречаются читателям на каждом шагу. Поэтому рассматривая, как научные открытия Гильберта, Гальвани, Вольты, Фарадея, Максвелла и др. воплотились в современные достижения цифровой техники, мы минуем многие ответвления инженерной мысли.

При реализации научных идей на практике вступают новые критерии успешности. Это надёжность, стоимость изготовления и использования оборудования (включая ремонт и оплату обслуживающего персонала).

Одним из первых коммерческих проектов, связанных с открытием электричества, был телеграф. Термин «телеграф» происходит от древнегреческих τῆλε – далеко и γράφω – «пишу» и означает возможность передачи информации на большие расстояния. Эта задача была важна во все времена. В древности для передачи важных сообщений использовали гонцов. Есть легенда о гонце, который в 490 году д.н.э. принёс в родные Афины весть, что греческая армия около города Марафон (примерно в 40 км от Афин) разбила войско персидского царя Дария. При этом он так самоотверженно бежал, что, передав сообщение о победе, скончался. В память о том гонце до сих пор спортсмены бегают марафонские дистанции.



*Рис. 60. Гонец из Марафона (Греция)*

Гонцы бегают (или скачут на лошади) быстро, но часто информацию нужно передать ещё быстрее, например, о приближении вражеской армии. Тогда можно заготовить много костров в пределах прямой видимости и передавать сигнал зажиганием огня. В фильме «Властелин колец»

прекрасно показано как с помощью таких огней Гондор позвал на помощь войска Рохана.

К сожалению, сигнальные огни могут передать ограниченное число сигналов. Что делать, если нужно передать длинный текст? Например, идут в море корабли. Как передать сообщение с одного корабля на другой? До изобретения радио моряки пользовались специальной «морской азбукой». Матрос брал в каждую руку по флажку. Каждое положение моряка (руки вверх, в стороны, под углом и пр.) означало букву. Таким способом можно было передавать сообщения со скоростью несколько слов в минуту.

Подобные системы передачи информации существовали и на суше. Наиболее удачным телеграфом можно считать «семафорную» систему, предложенную в 1792 году французским механиком Клодом Шаппом (*Claude Chappe*, 1763 – 1805). Строилась система башен, каждая башня находилась в пределах прямой видимости двух других. Наверху каждой башни устанавливался большой вращающийся шест, к которому крепились ещё два вращающихся шеста поменьше (рис. 61). Взаимное расположение шестов означало определённую букву. Телеграфист принимал сообщение с одной башни (иногда с помощью подзорной трубы) и тут же передавал такое же сообщение дальше, поворачивая шесты на своей башне. Такой способ позволял передавать сообщения со скоростью до двух слов в минуту.

Первая подобная телеграфная линия была построена в 1793 – 1794 годах между городами Париж и Лиль. Передачу сообщений на расстояние 225 км обеспечивали 22 башни. Основными недостатками семафорного телеграфа было то, что он мог работать только днём в условиях хорошей видимости, поэтому второе название такой системы – оптический телеграф.

Другой недостаток семафорного телеграфа – возможность искажения информации в процессе передачи. Маленькие дети любят играть в «испорченный телефон», когда сообщение, передаваемое шёпотом от од-



*Клод Шанн (Claude Chappe, 1763 – 1805)*



Рис. 61. Семафорный телеграф Шаппа в Литермонте (Германия)

ного игрока к другому, сильно меняет свой смысл. Умышленное искажение информации красочно описано в бессмертном романе А. Дюма «Граф Монте-Кристо». Граф подкупил служителя одной телеграфной башни (за совсем небольшую сумму), тот передал неверное сообщение, что привело к большим финансовым убыткам недруга графа. Тем не менее, семафорный телеграф активно развивался. Его использовал Наполеон для управления войсками. В частности, передвижные башенки были установлены при его вторжении в Россию.

Похожую оптическую телеграфную систему создал испанский инженер Августин де Бетанкур (*Agustín de Betancourt*, 1758 – 1824). Построенная им в 1798 году телеграфная линия между Мадридом и Кадисом оказалась настолько удачной, что инквизиция заподозрила его в связях с дьяволом – только дьявол мог так быстро передавать информацию на такие расстояния. Опасность ареста, а также нестабильность политической ситуации в Испании заставили Бетанкура перебраться в Россию, где он впоследствии стал директором Главного управления путей сообщения. В 1824 году была сооружена линия оптического телеграфа системы Бетанкура между Петербургом и Шлиссельбургом. В 1833 году была построена линия Петербург — Кронштадт (через Стрельну и Ораниенбаум).

Если Вы бывали в Петербурге, то, возможно, Вы замечали, что симметрию Зимнего дворца нарушает

небольшая угловая башенка со стороны Адмиралтейства (рис. 62). Именно на этой башенке находились вращающиеся шесты, с помощью которых император Николай мог отдавать приказы войскам прямо из своего кабинета. Промежуточная станция телеграфа располагалась на башне Городской думы, откуда могли посылать сообщения



Августин де Бетанкур  
(1758 – 1824)

частные лица, но стоило это очень дорого, поэтому телеграф коммерческого успеха не имел, и использовался, в основном, для военных целей.

Самая длинная линия оптического телеграфа была построена между Петербургом и Варшавой в 1839 году. На расстоянии 1200 км было построено 149 промежуточных станций высотой 15 – 17 метров каждая. Линию обслуживали 1900 (!) человек. При ясной погоде сообщения до Варшавы доходили за 15 – 20 минут. Линия просуществовала до 1854 года, когда была заменена электрическим телеграфом.

Таким образом, телеграф появился задолго до электричества, но достижения в науке об электричестве стимулировали создание быстродействующих электрических систем телеграфа. Первые проекты появились ещё до появления источников тока. Идея очень проста. Если к одному концу проволоки поднести заряженный предмет, то оба конца проволоки электризуются, причём, можно сказать, мгновенно. Можно взять много проволочек – по числу букв алфавита и посылать сигналы. На другом конце проволочек подвесить шарики с изображением букв. Шарики будут электризоваться, притягиваться, и таким способом можно по буквам передавать текст.

Но от идеи до реализации – огромная дистанция. Основная сложность – это создать хорошую изоляцию проводов, ведь тогда ещё не было ни резины, ни пластмассы. Первый работающий электростатический телеграф построил в 1774 году швейцарский физик Георг Луи Ле Саж (*Georges Louis Le Sage*; 1724—1803). Правда, телеграф действовал только на короткие расстояния – между комнатами его дома (рис. 63). Но его идеи с электризацией шариков не оказались совсем уж бесполезными. Электризация шариков используется в наши дни в электронных чернилах. Пере-

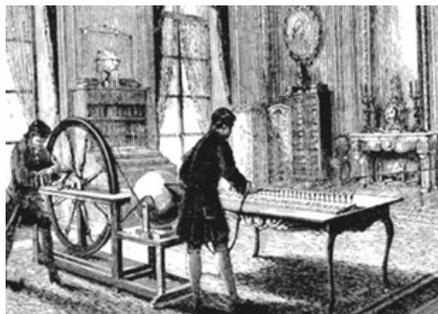


*Рис. 62. Башня оптического телеграфа на Зимнем дворце*



*Георг Луи Ле Саж  
(1724—1803)*

жила века и другая идея Ле Сажа – прокладывать телеграфные провода под землёй, в глиняных трубах. Правда, сейчас для этих целей используют керамику, резину и различные виды пластика.



*Рис. 63. Электростатический телеграф*

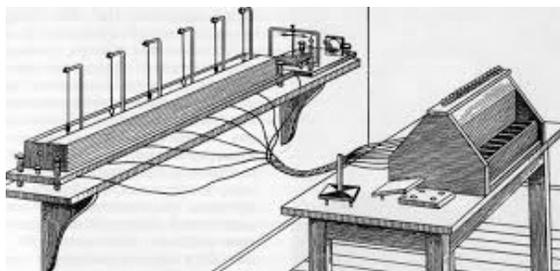
Открытие электрического тока позволило создать более совершенные системы. Идея проста: линия передачи сообщения состоит из двух длинных проводов, батареек и ключа (выключателя). Если на одном конце линии замкнуть цепь, то по проводам пойдёт ток. Осталось заметить ток на другом конце линии, лампочек ещё не изобрели. В 1820 году Эрстед научился регистрировать протекание тока по отклонению стрелки компаса, поэтому неудивительно, что первой мыслью было использовать поворот магнитной стрелки.



*Павел Львович Шиллинг (1786 – 1837)*

Первый электромагнитный телеграф был создан в России. Российский дипломат и изобретатель барон Павел Львович Шиллинг (1786 – 1837) в 1832 году испытал в своём доме телеграфную линию, состоящую из 6 магнитных стрелок, подвешенных на шёлковых нитках (рис. 64). Стрелки помещались внутри катушек с проводами. При замыкании ключа внутри катушки шёл ток, и стрелки отклонялись. Шиллинг также разработал специальный код для передачи сообщений. Телеграф Шиллинга соединил Зимний дворец и министерство путей сообщения. Император Николай поручил Шиллингу создать телеграфную линию между Кронштадтом и Петербургом, но

это не было реализовано из-за смерти Шиллинга в 1837 году.



*Рис. 64. Телеграф Шиллинга*

Телеграф Шиллинга и предыдущие системы имели очевидный недостаток. Передаваемые сигналы очень скоротечны. Если отвлечься или неверно понять сигнал, проверить правильность переданной информации уже нельзя. Следующий этап изобретательской мысли – создание автоматического записывающего устройства. Как ни странно, успех сопутствовал не физика, а ... художнику.

Сэмюэл Морзе (*Samuel Morse*, 1791 – 1872) до 45 лет был профессиональным художником, президентом национальной академии дизайна в Нью-Йорке. На рис. 65 представлена одна из его картин. В 1836 году он случайно (опять случайность!) узнаёт о телеграфе и, увлечшись новой идеей, целиком отдаётся изобретательству. Главная проблема того времени – ошибки при передаче информации. Морзе хочет оставить только один канал, это упростит приём информации и одновременно сделает прокладку телеграфа более дешёвой. Чтобы посланный текст читался без искажений. Морзе создаёт код, носящий его имя, который (с некоторыми изменениями 1848 года) дошёл до наших дней. Русская кодировка появилась в 1856 году.



Код Морзе очень прост в передаче – чередование длинных (тире) и коротких (точка) сигналов. Морзе придумал, как автоматизировать приём сигналов. Всё гени-

*Сэмюэл Морзе (1791 – 1872)*



Рис. 65. Сэмюэл Морзе. Уми-  
рающий Гераклес

альное – просто. Схема телеграфа Морзе представлена на рис. 66, а на рис. 67 – фотография аппарата того времени.

На передающей станции (1) находится батарейка (4) и ключ (3), которым можно электрическую цепь замыкать и размыкать. На принимающей станции (2) приём сигналов осуществляется с помощью электромагнита (7), который прижимает острую палочку (8) к бумажной ленте (12), прижатой к валику (10). Рулон бумажной ленты (9) равномерно вращает пружинный механизм (11). Длинный сигнал – долгое прижатие, на бумаге появляется тире, короткий сигнал – короткое прижатие,

на бумаге появляется точка (рис. 66).

Читателей может смутить, что передающая и принимающая станции соединены только одним проводом (6). Действительно в телеграфе с целью экономии проводов для передачи сигналов используют один провод. Роль второго провода выполняет заземление (5).

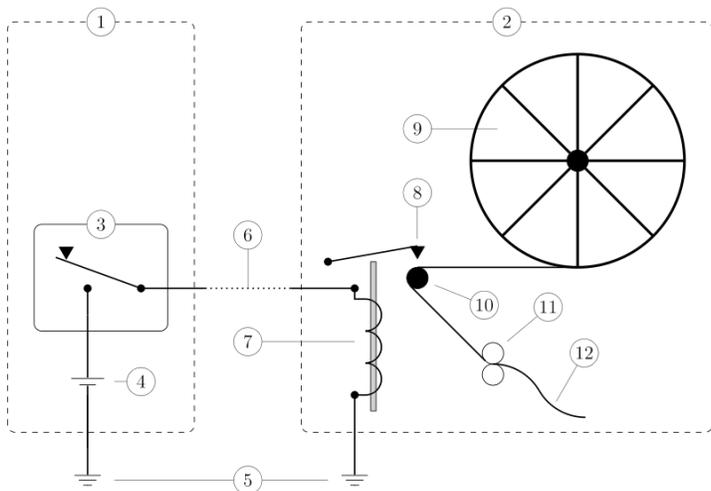


Рис. 66. Схема телеграфа Морзе

Идея проста, но создание нового телеграфа упирается в финансирование. Только в 1843 году Морзе получает субсидию от конгресса США на строительство телеграфа от Вашингтона до Балтимора (40 км).

Говорят, что реализация проекта – это не движение по заранее намеченному плану, а борьба с самыми неожиданными затруднениями. Как прокладывать кабель? Первоначально планировалось тянуть его под землёй. Но в то время не было опыта создания надёжной изоляции, которая выдержала бы длительное пребывание в земле, поэтому решили тянуть воздушную линию. Тогда встал вопрос: где взять изоляторы? Ведь современных фарфоровых изоляторов, тогда ещё не выпускали. Но, как говорится, «голь на выдумки хитра». Провода стали подвешивать на обычные стеклянные бутылки. И снова проблема: силы тока от батареек на 40 км не хватило. Что делать? Проект под угрозой, затраченные деньги не вернуть. И снова на выручку приходит инженерная смекалка – создаётся промежуточная релейная станция. Собственно, изобретать реле было не нужно, оно было изобретено Джозефом Генри в 1831 году. Существуют различные схемы реле, на рис. 68 представлена одна из них.



Рис. 67. Телеграфный аппарат XIX века



Рис. 68. Устройство реле

Слово «реле» происходит от английского *relay* – передача эстафеты. Основу реле представляет катушка (1), в которой для увеличения магнитного поля вставлен железный сердечник (2). При прохождении тока

через катушку в ней создаётся магнитное поле, которое притягивает подвижный контакт (3) и замыкает неподвижный контакт (4). Подвижный контакт вращается вокруг неподвижного корпуса (5). После того, как в катушке ток перестает течь, подвижный контакт уже не притягивается, пружина (6) возвращает его в прежнее положение, и контакт размыкается. Реле похоже на показанный выше механизм телеграфного аппарата Морзе, только в аппарате Морзе электромагнит прижимал острую палочку, а в реле – электрический контакт.

Релейная станция представляет собой простейший усилитель сигналов. Упрощённая схема представлена на рис. 69. На передающей станции телеграфист замыкает ключ, по телеграфной линии течёт ток. Поскольку телеграфная линия очень длинная, то сопротивление телеграфной линии большое, и ток маленький. Но этого тока достаточно, чтобы на релейной станции электромагнит в реле толкнул подвижный контакт и замкнул вторую линию. Заметим, что первая и вторая телеграфная линии не имеют электрической связи. Электромагнит включает ток во второй линии, примерно также, как мы рукой нажимаем рычажок выключателя. Небольшие усилия нашей руки управляют рычажком выключателя, который может включать и выключать большой ток.

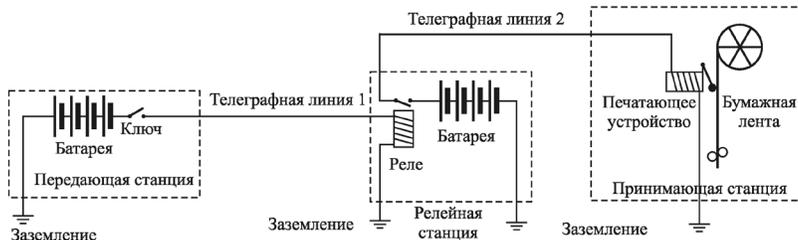


Рис. 69. Упрощённая схема релейной станции

Не странно ли, что небольшие усилия могут управлять большими токами? Не противоречит ли это закону сохранения энергии? Вовсе нет. Энергия в электрической цепи берется не от усилия руки, а из сети, а в случае релейной станции – от второй батареи. Таким образом, электромагнит на релейной станции включает и выключает ток во второй цепи, и сигнал проходит по второй цепи, используя силу второй батарейки (рис. 69).

К сожалению, релейный переключатель работает по принципу «всё или

ничего». С его помощью можно усилить сигналы типа «точки – тире», но нельзя усилить человеческую речь. Впрочем, о передачи голоса, тем более, о его усилении в то время ещё не помышляли.

Так, двигаясь через проблемы, Морзе совместно со своим компаньоном – американским инженером Альфредом Вейлом (*Alfred Vail*, 1807 – 1859) реализовали проект, и 24 мая 1844 года линия заработала. Большую техническую помощь им оказал уже упоминавшийся Джозеф Генри. Позже палочку в принимающем аппарате заменили краской и колёсиком, которое прижималось к бумаге и оставляло на ней длинный или короткий след. Система телеграфа Морзе оказалась очень удачной, его аппарат позволял передавать в среднем до 13 слов в минуту, распространение сигнала можно считать мгновенным, его стали использовать в коммерческих целях. Нововведение быстро распространилось по Америке и Европе, а автор изобретения – Морзе получил солидное денежное вознаграждение и до конца жизни занимался благотворительностью, поддерживая школы, университеты, церковь и бедных художников.

Но инженерная мысль не стоит на месте. Можно ли передать не только точки – тире, но и изображения? В эпоху, когда ещё не было даже намёка на компьютеры это кажется невозможным. Тем не менее, уже в 1843 году шотландский часовщик, Александр Бейн (*Alexander Bain*, 1811 – 1877) придумал, как передавать изображения, правда, только чёрно-белые и не очень высокого качества.

Телеграф Бейна можно назвать дедушкой современных факсов. Его основу составляли два маятника, движение которых должны быть синхронизованы с большой точностью. Для синхронизации использовались электрические сигналы. Когда начинал двигаться маятник на одном аппарате, передавался сигнал, запускающий маятник на втором аппарате. Чтобы передать рисунок, его нужно было сначала выгравировать на медной пластине (фольге). Можно было также использовать выпуклые буквы типографского шрифта. К маятнику на передающем устройстве была прикреплена металлическая палочка, которая скользила вдоль листа. В тот момент, когда она касалась выпуклостей на рисунке, замыкалась цепь. После каждого качания маятника пластина продвигалась чуть вперёд, пока не заканчивалось сканирование всего рисунка. Сложнее было с регистрацией сигнала. Фотографий ещё не было, использовалась бумага, вымоченная в иодиде калия, который при прохождении электрического тока меняет цвет.

Можно только удивляться изобретательскому мастерству тех лет, когда столь хитроумные приборы создавались столь примитивными (с нашей точки зрения) технологиями. Телеграф Бейна был испытан на линии длиной в 70 км – от Эдинбурга до Глазго. Но его изобретение в то время не получило распространения по нескольким причинам. Во-первых, нужно было специальным образом переносить рисунок на фольгу. Во-вторых, качество передаваемого рисунка оставляло желать лучшего. В-третьих, для передачи рисунка требовалось на длительное время занимать телеграфную линию. И, наконец, видимо в то время не было потребности в быстрой передаче рисунков. Уже позже, в 1856 году флорентийский аббат и изобретатель Джованни Казелли (*Giovanni Caselli*, 1815 – 1891) внёс много усовершенствований в конструкцию телеграфа Бейна. Например, рисунки делались непроводящим лаком по оловянной или свинцовой фольге, что существенно облегчило их создание. При финансовой поддержке Наполеона III Казелли проложил линии для коммерческой передачи изображений между Парижем и Марселем (1863) и между Парижем и Лионом (1865). Короткое время телеграф Казелли работал между Петербургом и Москвой (1866 – 1868). Но у него была низкая пропускная способность, он оказался дорог в обслуживании, и от него пришлось отказаться. Работавшие на этой линии аппараты Казелли хранятся сейчас в Санкт-Петербурге в Центральном музее связи имени А.С. Попова (рис. 70). Идея сканирования рисунков сильно опередила технические возможности своего времени. Настоящее развитие факсов началось после изобретения фотографии.



Рис. 70. Аппараты телеграфа Казелли 1868 года (передача изображений)

В это же время появляется идея передавать на расстояние человеческий голос. Первым успеха добился итальянский изобретатель Антонио Меуччи (*Antonio Meucci*, 1808 – 1889). Он начал свой жизненный путь с работ по совершенствованию акустики в театре во Флоренции. Меуччи создал систему труб, которые использовались в то время (и используются до сих пор!) на кораблях для переговоров между капитаном, механиком и др. службами. Из-за связи с революционером

Джузеппе Гарибальди (*Giuseppe Garibaldi*, 1807 – 1882) Меуччи с женой эмигрировал в 1835 году на Кубу, где занимался реконструкцией театра в Гаване.

Меуччи интересовало всё, что связано с электричеством. Он сделал генератор тока и занялся лечением больных ревматизмом по методу немецкого врача Франца Антона Месмера (*Franz Anton Mesmer*, 1734 – 1815). В 1849 году во время одного из сеансов Меуччи неожиданно услышал переданный по проводам вскрик больного. Именно это случайность (опять случайность!) послужила отправной точкой для создания телефона.

В 1850 году Меуччи переехал в США, где продолжил работать над изобретением. В поисках спонсоров он в 1860 году опубликовал статью в Нью-Йоркской газете, где описал свой способ превращения звука в электрические сигналы. Своё изобретение Меуччи назвал на итальянский манер телектрофон (*telectrofono*). Телектрофон представлял собой две трубки, соединённые электрическим проводом (рис. 71). В каждой трубке была мембрана с магнитом. Колебания мембраны по закону электромагнитной индукции наводили ток, который по проводу передавался на вторую трубку и вызывал колебания второй мембраны.

Меуччи передал описание телектрофона компании *Western Union* в надежде на дальнейшее сотрудничество, однако оно осталось без движения. Возможно, это вызвано тем, что телектрофон позволял передавать голос на малое расстояние, а слышимость оставляла желать лучшего. В 1871 году Меуччи подал патентную заявку №3335 на «звуковой телеграф», но по непонятной причине в 1875 году он отказался её поддерживать, и заявка потеряла свою патентную силу.

Следует заметить, что всего на счету Меуччи 14 запатентованных изобретений в области акустики, строительства, физиотерапии, электричества и др., но ни одно изобретение не принесло ему коммерческую выгоду.

Идея передавать на расстояние звук приходила и другим изобретателям. В 1854 году сотрудник телеграфа в Париже Шарль Бурсель (*Charles Bourseul*, 1829

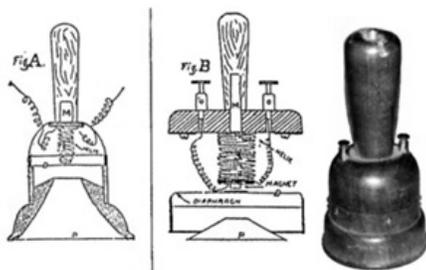


Рис. 71. Телектрофон Меуччи

– 1920) опубликовал идею передачи голоса по проводам. Он предлагал использовать металлическую пластину, которая бы под действием голоса вибрировала и замыкала провода подобно телеграфному ключу. Однако идея осталась только на бумаге. В 1861 году немецкий физик Иоганн Филипп Райз (*Johann Philipp Reis*, 1834 – 1874) создал (скорее всего, независимо от Меуччи) устройство, которое назвал «телефоном». Телефон имел микрофон, динамик и мог передавать человеческую речь по проводам на расстояние 100 метров. Его изобретение не вызвало интереса в Германии. В 1872 году оно было представлено в США, где им заинтересовался Александр Белл (*Alexander Bell*, 1847 – 1922).

В один день 14 февраля 1876 года два американских изобретателя Александр Белл и Илайша Грей (*Elisha Gray*, 1835 – 1901) подали заявку на передачу звука по проводам, причём Белл подал на несколько часов раньше. Скорее всего, они даже не знали о работах друг друга, поэтому одновременная подачи заявки была случайностью. Началась «патентная война», которая вылилась в ряд судебных разбирательств. Оспорить своё первенство пытался и Меуччи. Но в конце концов выиграл Белл. Этому способствовало то, что телефонные аппараты Белла были лучше приспособлены для передачи человеческой речи. Хотя следует заметить, что на момент подачи заявки ни у Белла, ни у Грея не было рабочего экземпляра. Первая публичная демонстрация телефона была проведена через несколько месяцев – в июне 1876 года на Промышленной выставке в Филадельфии.

Изобретение телефона Беллом – это долгий и кропотливый труд, но и здесь не обошлось без случайности. У матери Белла были проблемы со слухом, Белл профессионально занялся постановкой произношения людям с ограниченным слухом. После того как он иммигрировал в 1870 году из Великобритании в Канаду, а затем в США, он продолжил обучать глухих детей и даже открыл для них школу. В 1872 году он стал профессором кафедры физиологии речи медицинского факультета Бостонского университета. В это время он решил заняться совершенствованием телеграфа, чтобы можно было передавать человеческую речь. Первоначально он вместе со своим помощником Томасом Уотсоном (*Thomas Watson*, 1854 – 1934) конструировал телеграф, в котором контакты замыкала вибрирующая пластинка (подобную идею десятилетием раньше высказывал Бурсель). Аппарат вмещал несколько таких пластинок разной длины, которые вибрировали с разными частотами. Финансовую помощь ему оказали двое родителей его учеников, молодого изобретателя консульти-

ровал уже упоминавшийся Джозеф Генри.

Принесшая успех случайность (!) произошла июньским днём 1875 года. Одна из вибрирующих пластин прилипла к контакту, Томас Уотсон пытался её освободить, при этом он несколько раз коснулся других пластинок. Сидевший в соседней комнате Белл услышал тихие, но ясные звуки – он быстро примчался к помощнику и понял в чём дело. Колебания пластинок индуцировали ток в катушке, расположенной рядом с вибрирующими пластинками. Белл не даром много лет изучал строение человеческого уха, и сообразил, как нужно расположить пластины в передатчике и приёмнике сигналов. Конструкция телефона Белла была похожа на телеграфон Меуччи. Неизвестно, был ли Белл знаком с устройством телеграфона. Скорее всего, Белл сделал свой телефон независимо от Меуччи.

Вначале изобретение телефона не было оценено. Нужно вспомнить, что в то время ещё не было усилителей электрических сигналов, поэтому первые телефоны Белла действовали на расстояния не более 250 м, и имели низкое качество звучания. Белл предлагал продать свой патент крупнейшей телеграфной фирме *Western Union* за 100 000\$, но она отказалась, тогда Белл при поддержке спонсоров основал собственную компанию *Bell Laboratories Telephone*.

Совершенствование телефонной связи активно продолжали многие изобретатели, в том числе Томас Эдисон (*Thomas Edison*, 1847 – 1931). К 1900 году в США было получено более 3000 патентов в этой области, а число телефонов составило несколько миллионов.

Внесли вклад в развитие телефона и российские инженеры. Генерал-майор Григорий Григорьевич Игнатьев (1846 – 1914) в 1879 году разработал устройство для одновременной передачи по одному и тому же проводу телеграфного и телефонного сигнала, что позволило использовать для телефонной связи уже построенные телеграфные линии.

Талантливые люди обычно талантливы во многих областях. Эдисон кроме работ по совершенствованию телефона занимался развитием телеграфа, киноаппаратуры, ламп накаливаниями, изобрёл фонограф – устройство для записи звука. Всего Эдисон получил более 1000 патентов в США и около 3000 в других странах. Белл кроме телефона изобрёл фотофон – устройство для передачи звука с помощью света. В те времена фотофон не получил распространения ввиду помех со стороны других источников света, но используемые сегодня оптоволоконные линии передачи ин-

формации являются наследниками идей Белла. Трагические события побудили Белла изобрести металлоискатель. В 1881 году выстрелом в спину был ранен президент США Джеймс Гарфилд. Врачи не смогли найти пулю, чтобы её извлечь – рентгеновских аппаратов тогда ещё не было. Белл создаёт металлоискатель для нахождения мелких железных предметов. Белл сделал также воздушного змея в форме египетской пирамиды, который по свидетельствам очевидцев мог поднять в воздух человека. В 1909-ом году он построил первый в Канаде аэроплан «Серебряный дротик». В 1919 году Белл сделал корабль на подводных крыльях, который развил рекордную по тем временам скорость – 113 км/час... Всего у Белла было (в соавторстве) несколько десятков патентов.

Получив от патента на телефон значительные средства Белл много внимания уделял поддержке людей с нарушением слуха, основал в Вашингтоне институт имени Алессандро Вольта, участвовал в создании в Америке Национального географического сообщества и основал журнал *«National Geographic»*, который издаётся до настоящего времени.

Илайша Грей, подавший заявку на передачу звука одновременно с Беллом, также не был обделён талантами. Он получил около 70 патентов США, много занимался электромузыкальными инструментами, его идеи легли в основу музыкального синтезатора.

Антонио Меуччи оказался почти забытым на фоне более удачных коллег – изобретателей. Но историческая справедливость, хотя и с большим запозданием, восторжествовала. В 2008 году в честь 200-летия Меуччи была выпущена монета в 5 Евро. В 2002 году Конгресс США принял резолюцию № 269, в которой признал настоящим изобретателем телефона не Белла, а Меуччи. Однако в других странах, в том числе в Канаде, эту резолюцию отвергли и изобретателем телефона по-прежнему считают Белла.



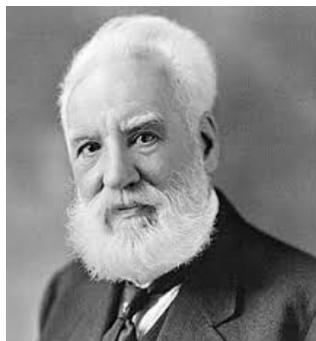
*Монета в честь Антонио Меуччи  
(1808 – 1889)*

Телеграф тоже не стоял на месте. Коммерческий успех стимулировал активность изобретателей. Телеграфные линии были постоянно перегружены. Требовалось увеличить пропускную способность линий и увеличить надёжность передачи. Как увеличить скорость

передачи текста? Заставлять телеграфистов всё быстрее нажимать на телеграфный ключ? Но ведь человеческие возможности ограничены. Кроме того, передающий телеграфист может ошибиться. Простая, но в тоже время успешная модернизация телеграфа была придумана английским физиком и изобретателем Чарльзом Уитстоном (*Charles Wheatstone*, 1802 – 1875).

Уитстон обладал разносторонними способностями. В школьном учебнике физики он упоминается как создатель электрической схемы – мостика Уитстона (1843). Занимался он и телеграфом. Мы уже обсуждали, что успех телеграфа Морзе определялся наличием записывающего устройства, без которого при приёме кодированного сигнала неизбежно появлялись бы ошибки. Уитстон предложил автоматизировать не только приём, но и передачу сообщений. Для этого он разработал перфоратор – устройство, которое позволяло записывать кодировку «точка – тире» в виде дырок на бумажной ленте. Телеграфисты стали записывать сообщения на перфоленду, перфоленда вставлялась в передающее устройство, специальные иглочки «ошупывали» дырочки в бумажной перфоленде, и в зависимости от положения дырочек аппараты передавали длинные (тире) или короткие (точка) сигналы (рис. 72).

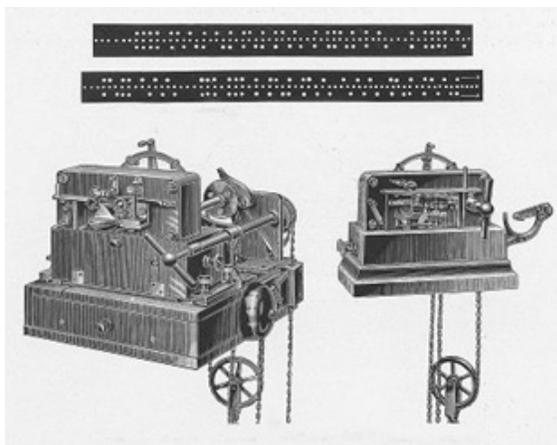
Может возникнуть вопрос: приведёт ли это к ускорению передачи? Всё равно скорость передачи ограничена скоростью работы телеграфиста. Но теперь набор текста могут делать сразу несколько телеграфистов и поочерёдно вставлять перфоленды в передающие устройства! Телеграф Уитстона позволял передавать до 600 (!) слов в минуту, вместо 13 слов в первоначальном аппарате Морзе. Правда, расшифровывать телеграммы также должны были несколько телеграфистов – одному человеку никак не успеть.



*Александр Белл  
(1847 – 1922)*



*Чарльз Уитстон  
(1802 – 1875)*



*Рис. 72. Телеграф Уитстона. Сверху – вид телеграфной ленты, снизу слева – принимающий аппарат, справа – передающий аппарат*

Коммерческий успех способствовал тому, что телеграфные линии протянулись по всей Европе и Америке. Если раньше почтовые сообщения шли неделями, то телеграф передавал их за считанные минуты. Встала насущная потребность соединить Англию с материком, а в перспективе Европу и Америку. Здесь всё упиралось в техническую проблему создания надёжной изоляции проводов. Вспомним, что резины тогда ещё не было.

Первая подводная изоляция была сделана из гуттаперчи – натуральной смолы, добываемой из некоторых растений. Гуттаперча схожа по своим свойствам с каучуком. И уже в 1849 году, всего через пять лет после первого успеха телеграфа Морзе, был проложен кабель между Англией и континентальной Европой. Большой вклад в исследование свойств гуттаперчи и в прокладке кабеля внёс английский инженер Уиллоуби Смит (*Willoughby Smith*, 1828 – 1891). Опыт оказался удачным, и начались попытки провести телеграф между Европой и Америкой. Первая попытка соединить кабелем Ирландию и остров Ньюфаундленд на восточном побережье Америки была предпринята в 1857 году. Кабель порвался, и его удалось проложить только в 1858 году, однако и он прослужил недолго. Заметим, что сама прокладка кабеля была сложной технической задачей. Кабель весил 3000 тонн и состоял из 530 тысяч километров медной про-

волоки (кабель был многожильным). Для его укладки использовали крупнейшие на тот момент военные корабли Великобритании и США — «Агамемнон» и «Ниагара» (грузоподъёмность каждого корабля не позволяла погрузить весь кабель).

Только в 1865 – 1866 годах удалось проложить кабель длиной 5100 км и наладить постоянную связь между Европой и Америкой. Если раньше новости из Старого света в Новый шли со скоростью бороздивших Атлантику кораблей, то теперь они доходили почти мгновенно. В 1870 году был проложен кабель из Лондона до Бомбея (Индия) с промежуточными ре-



*Уиллоуби Смит (1828 – 1891)*

лейными станциями в Египте и на Мальте. Телеграф на десятилетия стал основным способом передачи информации на большие расстояния, но и он утратил своё значение после появления радиосвязи.

Развитие телеграфа стимулировало исследования в разных областях науки и техники. И здесь снова случай (в который раз!) помог обнаружить эффект, открывший новое направление технической мысли. Упомянутый выше Уиллоуби Смит после успешной прокладки трансатлантического кабеля продолжал работать в этой области. Его занимала чисто прикладная проблема – увеличение надёжности кабелей. В то время для кабелей на дне моря использовали проволоку в изоляции из гуттаперчи, а для защиты от якорей и рыболовных снастей снаружи кабель обвивали стальной проволокой. Смит для изоляции проводов пробовал разные материалы, в том числе не так давно (в 1817 году) открытое вещество – селен (химическое обозначение – *Se*). Селен при нагревании до 230°C плавится, а при остывании он снова затвердевает и может служить изоляцией. Селен проводит электрический ток гораздо хуже металлов, но всё же лучше изоляторов. Говоря современным языком, селен является *полупроводником*. При измерении сопротивления селеновых стержней Смита, можно сказать, постигла неудача – сопротивление менялось от измерения к измерению. Другой бы забросил этот странный материал, решил бы, что дело в плохом контакте и пр. Но Уиллоуби Смит был опытным инженером и не мог пройти мимо такого эффекта, не разобравшись в нём. Он

обратил внимание, что сопротивление меняется при освещении стержней светом (по некоторым сведениям, на роль света ему указал его помощник Жозеф Мей (*Joseph May*)). Чем ярче свет – тем меньше сопротивление.

В те времена строение веществ было изучено мало и такое открытие могло быть сделано только случайно. Но важно, что Уиллоуби Смит был *готов увидеть новое*. Он тотчас, в 1873 году опубликовал результаты своих экспериментов с селеном. Таким образом, чисто прикладная работа дала начало целому разделу фундаментальной физики. И дело даже не только в исследовании взаимодействия света и селена – началась эпоха *физики полупроводников*.

Что такое полупроводники? До 1873 года инженеров – электриков интересовали два вида веществ. С одной стороны, нужны были материалы, хорошо проводившие ток (проводники), из которых можно было делать провода. Хорошими проводниками являются все металлы, особенно малые сопротивления имеют золото, серебро и медь, поэтому провода часто делают из меди, которая намного дешевле серебра, а контакты (особенно в современных микросхемах) делают серебряными или даже используют позолоту, поскольку золото не окисляется. С другой стороны, нужны, были практически не проводившие ток изоляторы, служившие для защиты проводов. Хорошими изоляторами являются стекло, резина, керамика. Вещества, которые имеют сопротивление много больше, чем проводники, но проводящие ток лучше изоляторов называют полупроводниками. С открытием Уиллоуби Смита фотопроводимости селена началось активное изучение полупроводников.

Собственно, Уиллоуби Смит не был первым, кто открыл воздействие света на электрический ток. За 30 лет до него, в 1839 году французский физик Александр Эдмон Беккерель (*Alexandre-Edmond Becquerel*, 1820 – 1891), работая в лаборатории своего отца, Антуана Беккереля, помещал в раствор электролита две платиновые пластины. Беккерель заметил, что при освещении одной из пластин, через гальванометр шёл ток! Открытие Беккереля привело к развитию целой отрасли техники. Хотя полученный ток оказался слишком мал, чтобы его использовать в электротехнике, но позже платиновые электроды были заменены на хлорсеребряные (*AgCl*), что привело к развитию фотохимии и, в конечном счёте, к изобретению фотографии. Заметим, что Эдмону Беккерелю было всего 19 лет, когда он сделал свое первое открытие, поэтому не следует думать, что открытия могут делать только умудрённые жизненным опытом учёные. Многие от-

крытия (особенно «случайные») делали как раз очень молодые исследователи. Но мы не будем подробно разбирать историю изобретения фотографии, чтобы не уйти в сторону от полупроводников.

Нужно также заметить, что Уиллоуби Смит также не был первым, кто исследовал полупроводники. Ещё Фарадей в серии своих статей «Экспериментальные исследования по электричеству» (1831 – 1835) описал эксперименты с сернистым серебром.

*№439. Я не знаю ни одного вещества, которое, подобно сернистому серебру, может в горячем состоянии сравниться с металлами в отношении проводимости электричества низкого напряжения и у которого, наряду с этим, в отличие от металлов, проводимость при охлаждении уменьшается, тогда как у металлов она, наоборот, увеличивается. Однако, если поискать, то, вероятно, можно будет найти немало таких веществ.*

*М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству.*

Иными словами, Фарадей обнаружил, что с увеличением температуры сопротивление сернистого серебра сильно уменьшалось. Таким образом, именно Фарадей открыл новый класс веществ – полупроводников. Однако это открытие Фарадея не вызвало интереса у современников. Представления о природе проводимости в то время были весьма туманны и факт, что у металлов при нагревании сопротивление растёт, был также непонятен, как и факт, что у сернистого серебра (а затем были открыты и другие материалы) сопротивление при нагревании падает.

Открытие Уиллоуби Смита воздействия света на селен вызвало большой интерес. Через четыре года, в 1877 году, английский исследователь Уильям Гриллс Адамс (*William Grylls Adams*, 1836 – 1915) и его студент Ричард Эванс Дей (*Richard Evans Day*) получили фототок при освещении пластины селена (*Se*) с присоединёнными к ней платиновыми проволочками (рис. 73).

Стали постепенно обрисовываться перспективы создания нового источника электрического тока за счёт солнечного света, что открывало большие технические возможности, а также сулило немалую прибыль.

Американский изобретатель Чарльз Фриттс (*Charles Fritts*, 1850 – 1903) в 1883 году создал солнечную батарею из тонкого слоя селена (25 – 125 микрон), который зажимал между листом золота (*Au*) и подложкой из дру-

гого метала (рис. 73). Стоимость батарей была высокой из-за стоимости материалов, а эффективность его батареи составляла примерно 1%, т.е. только 1% падающей на селеновую пластинку солнечной энергии преобразовывалась в электрическую. Ввиду малой мощности батареи было неясно для чего её можно было бы использовать – для телеграфных аппаратов она была слишком маломощной, а устройств с малым потреблением тока (калькуляторы, светодиоды) ещё не создали. Тем не менее, Фриттс был уверен, что со временем солнечные батареи заменят электрические станции.

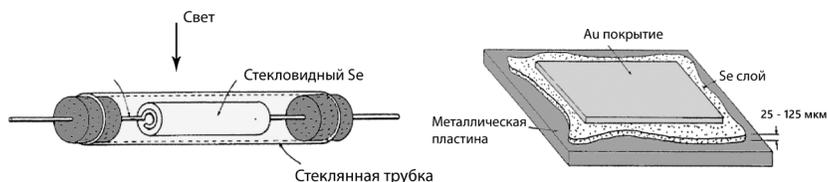


Рис. 73. Фотозлемент Адамса (слева) и Фриттса (справа), Se – селен, Au – золото

Следует отметить, что поиски элементов питания велись без понимания того, каким образом свет воздействует на вещество. Ещё не было известно строение атома, не были открыты электроны. Развитие технической мысли сдерживалось недостатком знаний фундаментальной науки. Промышленное применение солнечных батарей нашли примерно через полвека после открытия Уиллоуби Смита.



Карл Фердинанд Браун  
(1850 – 1918)

Практически одновременно с открытием Уиллоуби Смитом фотоэлектрических свойств селена, было найдено ещё одно необычное свойство полупроводников. Немецкий физик Карл Фердинанд Браун (*Karl Ferdinand Braun*, 1850 – 1918) в 1874 году (ему было всего 24 года!) обнаружил, что у многих полупроводников сопротивление зависит от величины тока. Более того, при контакте полупроводника (он использовал сульфид свинца) с металлом, сопротивление зависело от направления тока! Полученные результаты противоречили закону Ома. Объяснения этим фактам дать не смогли,

применить их на практике не удалось, и открытие Брауна в 1874 году не вызвало большого интереса. Впрочем, Брауну посчастливилось дожить до того дня, когда его открытие стало востребованным, что мы подробно обсудим в следующей главе.

## **ИТОГИ V ГЛАВЫ**

Благодаря открытию закона электромагнитной индукции появились источники электрического тока. Электрический ток начали применять в телеграфе, который до этого был механическим. Развитие телеграфа привело к созданию новых технических устройств и к открытию селеновых фотоэлементов (хоть и не очень эффективных). В 1874 году происходит открытие односторонней проводимости, но это явление не было понято и не вызвало большого интереса.

## ГЛАВА 6. СВЯЗЬ БЕЗ ПРОВОДОВ

- Ты слышал? При раскопке Помпей нашли провод.
- Ну и что?
- Значит, у них уже был проводной телеграф!
- Подумаешь. А при раскопке Вавилона не нашли проводов.
- Ну и что?
- Значит, там уже был беспроводной телеграф!

(из анекдота)

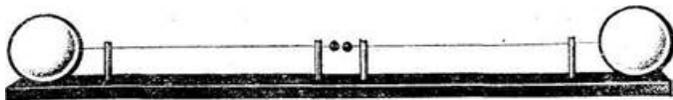


*Генрих Рудольф Герц  
(1857 – 1894)*

В 1887 году происходит событие, кардинально изменившее представление о возможностях передачи информации. 30-летнему немецкому физику Генриху Рудольфу Герцу (*Heinrich Rudolf Hertz, 1857 – 1894*) удалось получить электромагнитные волны. То, что ещё в 1830-ые годы предположил Фарадей, что в 1860-ые годы теоретически обосновал Максвелл, наконец, получило экспериментальное подтверждение.

С первого взгляда, эксперимент Герца очень прост, даже удивительно, что никто не догадался его сделать раньше.

Передачик (вibrator) представлял собой просто два одинаковых металлических стержня с шарами на концах (рис. 74). Суммарная длина стержней в разных экспериментах составляла от 1 до 2,5 метров. Размеры шаров были от 10 до 30 см. Между стержнями был маленький промежуток (несколько миллиметров).



*Рис. 74. Вибратор Герца*

Возникают вопросы: как к такому вибратору приложить напряжение и как понять, что радиоволны есть? Чтобы приложить напряжение Герц использовал индукционные катушки (трансформаторная связь), как показано на рис. 75. Когда Герц замыкал ключ (К), через индукционную катушку (Ин) начинал идти ток, за счёт явления электромагнитной индукции напряжение подавалось на вторую катушку, от неё – на стержни вибратора (В), между стержнями проскакивала искра, и при этом излучались электромагнитные радиоволны. Герц разработал также приёмник волн. Это был металлический стержень, согнутый в виде прямоугольника или круга с небольшим зазором (И). Когда через такой контур проходили электромагнитные волны, из-за электромагнитной индукции между шариками возникало напряжение, и через промежуток проскакивала маленькая искра.

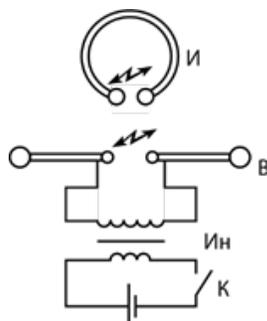


Рис. 75. Передатчик (вибратор) и приёмник Герца

Герц не просто показал наличие электромагнитных волн. Он экспериментально продемонстрировал, что волны отражаются от металлических поверхностей, преломляются в диэлектрике – в полном соответствии с теорией Максвелла. Этот эксперимент обессмертил имя Герца – в его честь названа единица частоты колебаний. Например, если маятник совершает одно колебание в секунду, то говорят, что частота колебаний равна одному герцу.

При внешней простоте провести такой эксперимент было непросто. Чтобы между стержнями проскочила искра, нужно было приложить очень большое напряжение. Если между контактами зазор в один сантиметр, то для искры нужно приложить напряжение (в зависимости от влажности) от 10 до 30 киловольт. Впрочем, не нужно всё изобретать самому, нужно уметь пользоваться тем, что сделали другие. Герц использовал для создания искры специальную катушку, которую ещё в 1851 году изобрел немецкий инженер Генрих Даниэль Румкорф (*Heinrich Daniel Ruhmkorff*; 1803 – 1877). Не вдаваясь в подробности, можно сказать, что катушка Румкорфа представляет собой соленоид с железным сердечником, и потому катушка имеет большую индуктивность. К ней присоединяют источник тока и постепенно увеличивают ток, создавая внутри катушки сильное магнитное поле. Затем источник быстро отсоединяют (размыкают

цепь), и вся энергия магнитного поля по закону электромагнитной индукции Фарадея мгновенно преобразуется в электрическое поле, настолько сильное, что может проскочить искра в несколько сантиметров.

Принципиальное устройство показано на рис. 76. Чтобы высокое напряжение не повредило источник, используют две вставленные друг в друга катушки *A* и *B* с общим сердечником *C*. К цепи источника *G* подключена катушка *A*. При размыкании контакта *E* изменение магнитного поля происходит в обеих катушках *A* и *B*. Катушка *B* имеет большую индуктивность (большое число обмоток), поэтому между контактами *H* будет возникать большое напряжение и проскакивать искра. Конденсатор *F* предотвращает сильный скачок напряжения в цепи катушки *A*. Такая катушка может давать не один, а серию импульсов. Сердечник *C* играет двойную роль. С одной стороны, он увеличивает индуктивность катушек, с другой – как магнит притягивает контакт *E* и размыкает его. После размыкания и срабатывания искры, пружина *D* замыкает контакт, и ток через катушку *A* снова начинает расти. Внешний вид катушки, используемой для школьных экспериментов, показан на рис. 77.

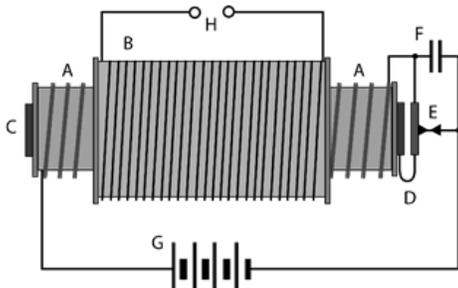


Рис. 76. Устройство катушки Румкорфа



Рис. 77. Внешний вид современной катушки Румкорфа

Надо заметить, что изобретения часто находят своё новое применение в самых неожиданных местах. Так модифицированная катушка Румкорфа по сей день используется в автомобильных свечах для создания искры в двигателе внутреннего сгорания.

Можно ли сказать, что Герц изобрёл радио? Герц показал *принципиальную возможность беспроводной связи*. Но его приёмник страдал двумя очевидными недостатками.

Во-первых, он регистрировал радиоволны на расстоянии всего в несколь-

ко метров. Используя вогнутые зеркала из металла (подобно зеркалам в прожекторах), Герц увеличил дальность приёма до 15 метров. Но всё равно это было слишком мало, чтобы беспроводную связь можно было использовать на практике.

Во-вторых, приёмник не имел никакой *избирательности*, т.е. он регистрировал волны от любого источника, мог реагировать даже на приближение грозы. Нужно было принципиально менять конструкцию приёмника.

Надо заметить, что сам Герц не представлял перспективы своего открытия. Он говорил, что это только эксперимент, доказывающий правоту Максвелла, и мы всего-навсего получили таинственные электромагнитные волны, которые нельзя увидеть глазом. К слову сказать, Герц ставил опыты, чтобы показать, что Максвелл ошибался, и электромагнитных волн не существует (!). Но эксперимент показал обратное.

В действительности же невозможно переоценить значение этих экспериментов для дальнейшего развития физики и техники. Открытие электромагнитных волн (радиоволн) вызвало всплеск научной и инженерно-технической мысли. Новый вид связи сулил огромные перспективы, как с военной, так и с коммерческой точки зрения. Изобретатели стали активно совершенствоваться, как передатчик, так и приёмник радиоволн. Остановимся на самых значительных изобретениях.

Впрочем, даже в то время было трудно изобрести что-то совсем новое. Чтобы быть успешным изобретателем, нужно знать о том, что было сделано до тебя. Ещё в 1835 году шведский учёный Петер Самуэль Мунк Аф Розеншельд (1804 – 1860) исследовал проводимость разных порошков из измельчённого олова, угля и др., помещая их в стеклянную трубку с двумя проволоками на концах. Он получил, что сопротивления порошков намного больше, чем исходных веществ, сделанных в виде целых стержней. При пропускании искры от лейденской банки сопротивление уменьшалось, а при встряхивании снова становилось большим.

С высоты сегодняшних знаний этот результат кажется очевидным. Ведь сопротивление проволоки возрастает при уменьшении её сечения, а площадь контакта у частиц порошка очень мала, поэтому и сопротивление должно быть велико. Для металлов большое сопротивление связано ещё и с тем, что на поверхности образуется тонкий слой окиси металла. Под действием искры частицы спекаются, площадь контакта увеличивается,

а при встряхивании картина восстанавливается. Но для того времени это было новым результатом, который тогда не нашёл практического применения.

Узнав об опытах Герца, французский физик Эдуард Бранли (*Edouard Branly*, 1844 – 1940), воспользовался результатами Розеншельда, и в 1890 году предложил использовать наполненную железными опилками стеклянную трубку для регистрации электромагнитных волн (рис. 78). Это устройство получило название радиокондуктор или *когерер* (от лат. *cohaerere* – сцепляться), иногда его называют трубкой Бранли.

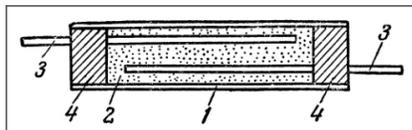


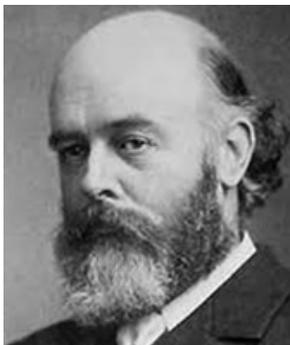
Рис. 78. Конструкция когерера (вид сверху).

1-стеклянная трубка, 2-железный порошок, 3-платиновые электроды,  
4-пробки

Чуть позже, в сентябре 1894 года английский физик Оливер Джозеф Лодж (*Oliver Joseph Lodge*, 1851 – 1940) на заседании Британской ассоциации в Оксфорде передал код Морзе через две каменные стены на расстояние свыше 100 метров. Для приёма сигналов он использовал когерер. После прохождения сигнала опилки спекались и когерер терял чувствительность. Для восстановления работоспособности когерера, металлические опилки периодически встряхивались специальным устройством.



Эдуард Бранли (*Edouard Branly*, 1844 – 1940)

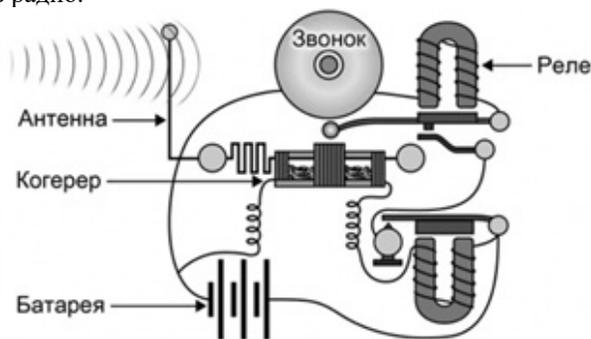


Оливер Джозеф Лодж  
(1851 – 1940)

Наша страна не отставала в этой технической гонке. Российский инженер Александр Степанович Попов (1859 – 1906) 25 апреля (7 мая по новому стилю) 1895 г. на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге продемонстрировал действие своего радиоприёмника. На рис. 79 показана схема приёмника А.С. Попова, а на рис. 80 – внешний вид. Он также использовал когерер (рис. 81) с железными опилками, но сделал реле для автоматического встряхивания опилок в когерере после каждого приёма сигнала и снабдил свой аппарат звонком, чтобы сигналы можно было принимать на слух. Таким образом, его радиоприёмник мог работать непрерывно, а посылать и принимать сигналы можно было, используя азбуку Морзе. Для улучшения качества приёма А.С. Попов использовал заземлённую проволоку (антенну). Сейчас 7 мая в нашей стране отмечается День радио.



*Александр Степанович Попов (1859 – 1906)*



*Рис. 79. Схема радио А.С. Попова*

Чувствительность приёмника Попова была такова, что могла улавливать электрический разряд грозовой молнии за 30 километров! Поэтому приёмник Попова называли «разрядоотметчик» или «грозоотметчик».

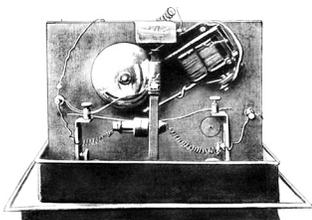


Рис. 80. Радио А.С. Попова

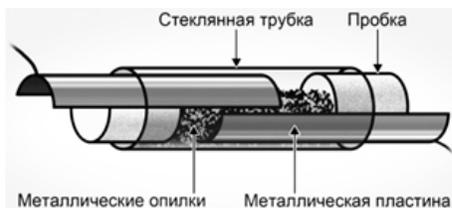
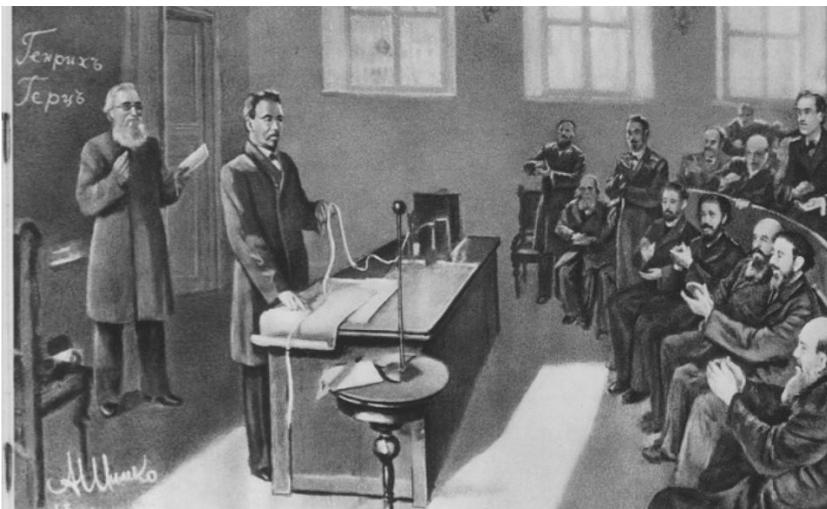


Рис. 81. Когерер А.С. Попова

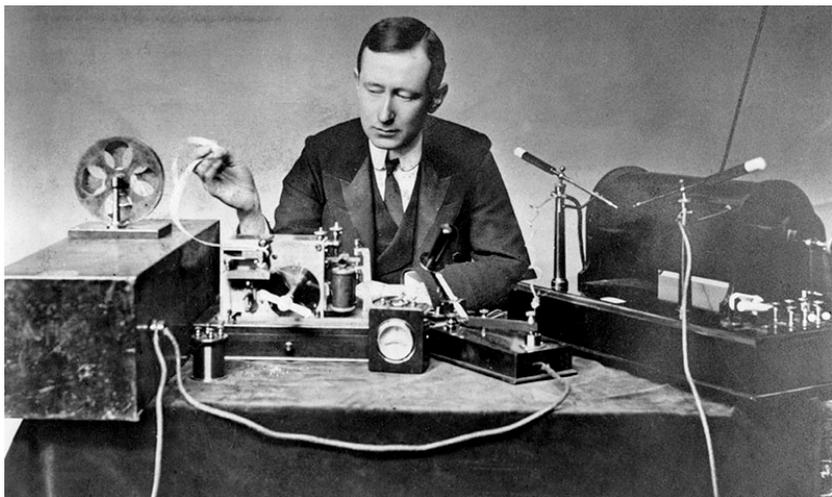
А.С. Попов совершенствует свой прибор и в марте 1896 г. передаёт радиogramму на расстояние 250 метров. В радиogramме всего два слова «*Heinrich Hertz*» (Генрих Герц). Летом 1896 г. военно-морское ведомство предоставляет А.С. Попову небольшую яхту. С этой яхты А.С. Попов принимал за несколько сот метров сигналы из Кронштадта.



А.С. Попов демонстрирует радио

Поскольку А.С. Попов был на службе военно-морского ведомства, то многие его работы были неизвестны за рубежом, и на западе изобретателем радио считают итальянского инженера и предпринимателя Гульельмо Маркони (*Guglielmo Marconi*, 1874 – 1937). Маркони создал похожий радиоприёмник годом позже, в 1896 году. Маркони также использовал

когерер, только вместо железных опилок, он взял сплав никеля и серебра, а воздух внутри пробирки был откачан. Позже Маркони создал фирму по производству радиоприёмников *Marconi's Wireless Telegraph*.



Гульельмо Маркони (*Guglielmo Marconi, 1874 – 1937*)

Следующий важный шаг в развитии радио сделал уже упоминавшийся английский физик Оливер Лодж. В 1898 году он получает патент № 609154 на «использование настраиваемой индукционной катушки или антенного контура в беспроводных передатчиках или приёмниках, или в обоих устройствах». Чтобы понять важность этого шага нужно вспомнить, что радио А.С. Попова реагировало на любой источник радиоволн. Сейчас же мы принимаем не все радиостанции сразу, а настраиваемся на нужную. В чём же состоит эта настройка?

Лодж использовал для настройки *колебательный контур*. Простейший колебательный контур представлен на рис. 82. Он представляет собой соединённые катушку индуктивности ( $L$ ), конденсатор ( $C$ ) и сопротивление ( $R$ ).

Если в такую систему установить источник переменного напряжения (на рис. 82 обозначен волнистой линией «~»), например, вра-

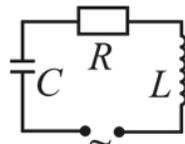


Рис. 82. Колебательный контур

шающийся диск Фарадея, то оказывается, что величина тока в цепи зависит от частоты напряжения. Эту зависимость ещё в 1853 году (т.е. за полвека до изобретения радио) получил английский физик Уильям Томсон (*William Thomson*, 1824 – 1907). Томсон внёс настолько значительный вклад в развитие многих разделов физики, что в 1892 году он был удостоен звания лорд Кельвин (*Kelvin*).

Чтобы уяснить смысл этой зависимости, можно провести аналогию с обычными качелями. Представьте себе, что Вы кого-то раскачиваете на качелях (сидящий при этом Вам не помогает и не мешает). При этом Вы не хотите прикладывать большие усилия, а слегка подталкиваете качели, когда они проходят нижнюю точку. Можете убедиться, что даже в этом случае качели раскачаются очень сильно, правда, не сразу. Попробуйте теперь раскачать качели с другой частотой, например, чтобы они качались вдвое чаще. Вам вряд ли удастся их сильно раскачать, даже если Вы будете делать это изо всех сил.

В колебательном контуре тоже есть частота, при которой величина тока в цепи будет максимальной. Эта частота называется *резонансной* и определяется *формулой Томсона*. Желающие увидеть эту формулу, могут открыть школьный учебник по физике. Нам важно знать, что эта частота зависит от индуктивности ( $L$ ) и ёмкости ( $C$ ).

Лодж включил колебательный контур в цепь передающего устройства и в цепь приёмника. На рис. 83 показана антенна приёмника ( $A$ ) с заземлением ( $G$ ) и колебательным контуром ( $LC$ ). Антенна с таким контуром будет принимать сигналы только определённой частоты (частота определяется формулой Томсона).

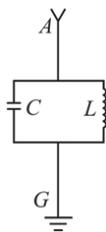


Рис. 83. Колебательный контур в антенне приёмника

Со времени Лоджа до наших дней принципы настройки на нужную радиостанцию не изменились. Для настройки нужно изменить величину индуктивности или ёмкости. Технически удобнее плавно изменять величину ёмкости конденсатора.

Остаётся заметить, что Лодж в дальнейшем не занимался производством радиоприёмников и продал свой патент компании Маркони в 1912 году.

Творчество Маркони – это пример того, что

прогресс могут двигать не только правильные, но и ошибочные идеи. Маркони считал, что радиоволны распространяются не по прямой, а огибают Землю. Отчасти это верно для длинных километровых волн, но совершенно неверно для используемых Маркони волн метрового диапазона. Тем не менее Маркони мечтал соединить радиосвязью Европу и Америку вопреки всем представлениям того времени о распространении радиоволн. И в 1901 году, используя 152 метровую антенну, Маркони принял сигнал, переданный из Англии в Америку! Только после этого достижения Маркони, противоречащего известным законам физики, учёные выдвинули гипотезу о существовании ионосферы, отражающей радиоволны подобно зеркалу (рис. 84). Позже существование ионосферы было экспериментально подтверждено. Таким образом, ошибочные представления Маркони не только позволили создать радиосвязь между континентами, но и положили начало новому разделу физики – исследованию верхних слоёв атмосферы Земли.

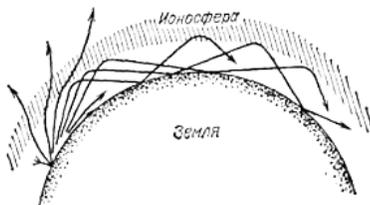


Рис. 84. Отражение радиоволн в ионосфере

Развитию радиосвязи способствовали многие учёные. В нашей стране изобретателем радио принято считать А.С. Попова. Так ли это? Существует много аргументов за и против того, был ли А.С. Попов первым создателем радио. Но роль А.С. Попова и его учеников в развитии радио именно в нашей стране несомненна.

Приёмное устройство радиоволн называют *детектором* от лат. *detect* – обнаружить. Несмотря на успехи использования когерера в качестве приёмника сигналов, это был технический тупик. Встряхивание носило случайный характер, сопротивление порошка постоянно менялось. Начался поиск приёмного устройства, основанного на иных принципах. И здесь пригодилось открытое Брауном свойство односторонней проводимости, возникающей при контакте металла и кристалла сульфида свинца, сделанное им в 1874 году. Брауну удалось сделать детектор из кристаллов

сульфида свинца (кристаллический детектор). Изобретение он запатентовал в 1899 году, т.е. спустя 25 лет! И в том же году он основал «Телеграфную компанию профессора Брауна».

Фактически Браун создал устройство, которое позже назовут *диодом* (греч. *di* – два и *odos* – путь). Диодами называют устройства, которые проводят ток в одном направлении намного лучше, чем в обратном. Чуть позже мы поймём, почему односторонняя проводимость нужна для приёма электромагнитных волн.

В 1900 году свою конструкцию кристаллического детектора сделал А.С. Попов. Он получил одностороннюю проводимость с помощью острых иголок, вставленных в угольные шайбы. Позже для этой цели стали использовать кусочек угля, прижатого к монетке.

Пример многолетней кропотливой работы продемонстрировал американский инженер Гринлиф Виттер Пикард (*Greenleaf Whittier Pickard*, 1877 – 1956). С 1902 до 1906 г при поиске кристаллического детектора, он перепробовал свыше 31 000 (!) комбинаций материалов и лучшим оказался плавный кремний.

Кристаллический детектор Пикарда был запатентован в 1906 году и представлял собой заострённый конец металла, прижатый пружиной к кристаллу кремния или галенита (сульфид свинца), как показано на рис. 85. За его форму детектор прозвали «кошачий ус». У детектора Пикарда был существенный недостаток – пружинка должна касаться кристалла в определённом месте. Малейший удар, толчок приводили к ухудшению чувствительности или к полному выходу из строя прибора, и нужно было очищать оксидную плёнку и подбирать новое место для контакта.



*Рис. 85. Кристаллический детектор Пикарда – «кошачий ус» на основе галенита (сульфид свинца). Небольшой отрезок провода слева – это «ус», а кусок серебристого материала снизу – кристалл галенита.*

Из-за своей нестабильности детектор Пикарда не выдержал конкуренции и уступил диодам, сделанных на основе электронных радиоламп. Электронные радиолампы разрабатывались примерно в тоже время, хотя сам принцип работы радиолампы – диода был запатентован Эдисоном ещё в 1883 году. Впрочем, через 30 лет о кристаллическом детекторе Пикарда снова вспомнили, что будет разобрано в следующей главе. Заметим, что Пикарду принадлежит используемое до сегодняшнего дня схематическое обозначение диода (рис. 86). С одной стороны, это обозначение контакта кристалла (треугольник) с металлической пластиной, с другой – это стрелка, указывающая направление, в котором диод пропускает электрический ток.

Почему было так важно наличие односторонней проводимости? Зачем в радиоприёмниках нужен диод?



Рис. 86. Условное обозначение диода

Звук – это колебания воздуха. Человеческое ухо может воспринимать колебания воздуха примерно от 20 герц до 20 килогерц (от 20 до 20 тысяч колебаний в секунду). Этот диапазон частот называют звуковым. Но радиопередатчики используют значительно большие частоты: сотни килогерц и мегагерцы. Для того, чтобы передать сигнал используют модуляцию. Существуют различные виды модуляций. Самой первой и самой простой была амплитудная модуляция (АМ). Её принцип показан на рис. 87.

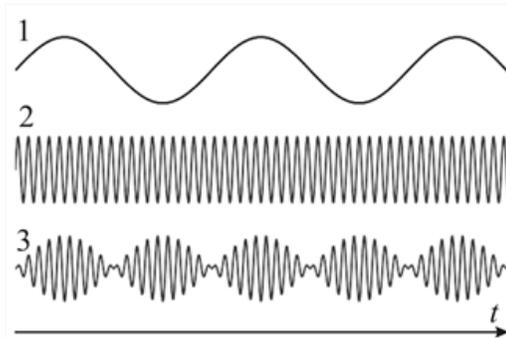


Рис. 87. Принцип амплитудной модуляции

Сверху показан сигнал звуковой частоты (речь, музыка и пр.), который поступает из микрофона в передатчик (линия 1). Волна передающей радиостанции (несущая волна) имеет значительно большую частоту (рис.

87, линия 2). После модуляции из радиопередатчика выходит электромагнитная волна, величина которой меняется, как показано на рис. 87, линия 3. Её частота соответствует частоте радиостанции, но амплитуда меняется, как у звуковой волны.

Электромагнитная волна распространяется во все стороны, и через некоторое время дойдёт до антенны радиоприёмника. Рассмотрим, как она преобразуется в радиоприёмнике. Для простоты возьмём (рис. 88) *детекторный* радиоприёмник, не имеющий источников питания.

Электромагнитные волны улавливаются антенной  $A$ . В антенну включён колебательный контур, состоящий из индуктивности  $L$  и конденсатора  $C_1$ . Колебания всех частот, кроме резонансной частоты колебательного контура, будут уходить в «землю»  $G$ . Колебания резонансной частоты будут накапливаться в колебательном контуре и поступать далее через диод  $D$  на конденсатор  $C_2$  и наушники (динамик)  $B$ .

Колебания радиоволн в антенне происходят так, что в течение половины периода величина принимаемого сигнала положительна, а в течение второй половины периода – отрицательна, как показано на рис. 89, сверху. Если их попытаться накопить на конденсаторе  $C_2$  (рис. 88) без диода, то суммарный сигнал будет равен нулю, т.е. мы ничего не услышим.

Но диод пропускает ток только в одном направлении. После прохождения сигнала через диод, на конденсатор  $C_2$  (рис. 88) поступают только положительные значения колебаний высокой частоты, как показано на рис. 89 в центре. Конденсатор  $C_2$  (рис. 88) имеет большую ёмкость, он не может

заряжаться и разряжаться так же быстро, как исходные колебания, поступающие на антенну. Поэтому поступающее высокочастотное напряжение за несколько периодов накопит на конденсаторе  $C_2$  заряд, который будет медленно разряжаться через наушники  $B$ . Хотя колебания на конденсаторе  $C_2$  имеют частоту много меньше, чем исходные колебания в антенне, они всё равно составляют сотни и тысячи колебаний в секунду, т.е. на динамик поступят исходные колебания звуко-

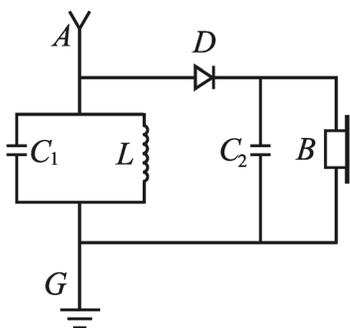
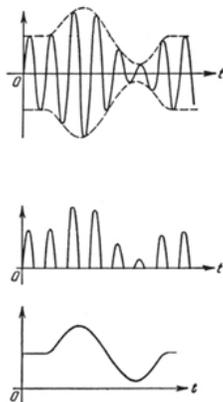


Рис. 88. Детекторный приёмник

вой частоты (рис. 89 снизу).

Далее сигнал можно усиливать, но рассмотрение более сложных схем радиотехники выходит за рамки данной книги.

Таким образом, диод, проводящий ток только в одном направлении, является ключевым элементом всех схем радиоприёмников. За свой вклад в науку Гульельмо Маркони и Фердинанд Браун в 1909 году были удостоены Нобелевской премии. По справедливости, её с ними должен был бы разделить Александр Попов. Но, к сожалению, Попов умер в 1906 году, а Нобелевская премия посмертно не присуждается.



*Рис. 89. Принцип детектирования*

## ИТОГИ VI ГЛАВЫ

Открытие Герцем радиоволн стимулировало развитие новой отрасли техники – радиотехники. Открытая Брауном односторонняя проводимость, хотя и не была объяснена, но нашла применение в радиотехнике. Изобретение электронных радиоламп на время отвлекло внимание учёных от исследования полупроводников.

## ГЛАВА 7. ОТ ИДЕИ ДО ВНЕДРЕНИЯ

В фантастических романах главное – это было радио.  
При нём ожидалось счастье человечества.  
Вот радио есть, а счастья нет.

*(Илья Ильф, из записных книжек)*

К началу XX века огромное военное и коммерческое значение беспроводной передачи информации сомнений не вызывало. Дальнейшее развитие связи требовало усиление сигнала, как у передающей станции, так и у приёмника.

Проще всего усиливать сигнал, переданный по коду Морзе, т.е. либо сигнал есть, либо он отсутствует (в радиотехнике такой вид сигналов часто называют «один-ноль»). Для усиления таких сигналов достаточно иметь реле, которое реагирует на входящий сигнал и замыкает цепь с новой батареей.

Гораздо сложнее, если входной сигнал может принимать любые значения от 0 до максимального. Рассмотрим задачу в общем виде. Для усиления сигнала нужно устройство с 2-мя входными контактами, 2-мя выходными и источником электричества (батарежкой), как условно показано на рис. 90. На два контакта подаётся входной сигнал, который должен каким-то образом (?) изменять сопротивление цепи усилителя. При изменении сопротивления изменяется сила тока в цепи усилителя. В результате на сопротивлении  $R$  будет меняться напряжение, которое подаётся на два других контакта – это и будет усиленный выходной сигнал. На практике часто один входной и один выходной контакт объединяют (например, заземлив), тогда получается устройство всего с тремя контактами.

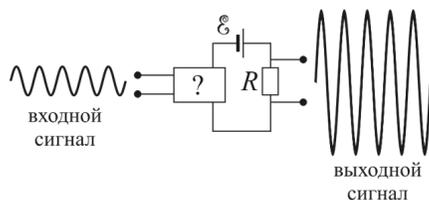
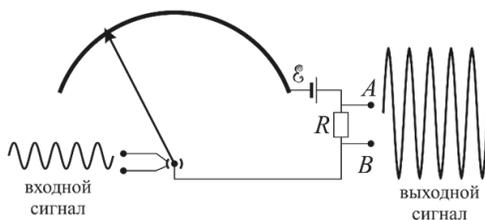


Рис. 90. Схема усилителя в общем виде

Теоретически такое устройство можно сделать на основе гальванометра, как показано на рис. 91. Пусть на вход гальванометра подаётся слабый сигнал. Изменение тока во входной цепи (в катушке гальванометра) приведёт к отклонению стрелки гальванометра. Известно, что сопротивление зависит от длины проводника. Создадим скользящий контакт между шкалой гальванометра и его стрелкой. Далее соединим один конец батарейки со шкалой, а второй со стрелкой. Выходной сигнал будем снимать с точек  $A$  и  $B$ . Если напряжение батарейки большое, то небольшие изменения входного сигнала приведут к большим изменениям тока (напряжения) на выходе. У нас получился усилитель сигнала.



*Рис. 91. Использование гальванометра в качестве усилителя*

Можно возразить, что сила трения будет мешать стрелке скользить по шкале. Но эту проблему можно решить, сделав скользящий контакт в виде колёсика. Есть другая, более существенная проблема. Стрелка не может двигаться очень быстро – в лучшем случае, она может совершать несколько колебаний в секунду. Чтобы передавать звук, нужно совершать сотни и тысячи колебаний в секунду. На практике для передачи радиосигналов и телевизионных сигналов используют сотни миллионов колебаний в секунду. Поэтому идея со стрелкой гальванометра для этого не годится. Устройство не должно иметь механических деталей, двигаться с такой частотой можно заставить только электроны, т.е. нужно чисто электрическое устройство.

В начале XX века для приёма, передачи и усиления радиосигналов стали использовать вакуумные электронные лампы (диод, триод и др.). Сегодня вакуумные лампы практически не употребляются из-за их больших размеров и большого потребления энергии, поэтому мы не будем обсуждать их устройство, чтобы не уйти в сторону от развития твердотельных устройств.

Для усилителя нужен материал, сопротивление которого можно было менять быстро и в широком диапазоне. Проводники для этого не годятся, поскольку у них в любом случае малые сопротивления, у изоляторов, наоборот, слишком большие сопротивления, поэтому нужно было использовать полупроводники. Тем более, уже было известно, что сопротивление селена сильно меняется при освещении светом. Однако в то время не существовало никакой теории проводимости полупроводников.

В 1910 году английский инженер Уильям Генри Икклз (*William Henry Eccles*, 1875 – 1966), работая с «кошачьим усом» Пикарда, обнаружил, что его сопротивление зависит от внешних условий, и даже может быть отрицательным, т.е. при увеличении тока через полупроводник, падение напряжения на нём не увеличивается, а уменьшается. Икклз использовал это свойство для усиления принимаемых сигналов. Нужно было подвести к полупроводнику напряжение, выше которого сопротивление становится отрицательным. Теперь, если подать на полупроводник небольшой сигнал, то есть немного увеличить напряжение, то ток в цепи сильно возрастёт.

Похожее свойство обнаружил в 1922 году молодой советский исследователь Олег Владимирович Лосев (1903 – 1942). Когда он сделал своё открытие ему было всего 19 лет! Он не имел даже высшего образования и работал в Нижегородской лаборатории имени В. И. Ленина на низшей должности. Он обнаружил отрицательное сопротивление у кристалла цинкита (окись цинка,  $ZnO$ ), соединённого с угольным волоском. На основе цинкита Лосев сконструировал приёмник с усилителем, который назвали «кристадин» (рис. 92). К сожалению, ни Лосев, ни его коллеги не смогли понять природу наблюдаемого эффекта. Его изобретение не получило распространения ввиду нестабильности работы. Позже он переехал в Ленинград, работал в 1-м Ленинградском медицинском институте и умер во время блокады в 1942 году.

Другую идею усиления сигнала предложил американский физик Юлий Эдгар Либиенфельд (1882 – 1963, родился во Львове). Он предложил управлять сопротивлением полупроводника с помощью электрического поля. На рис. 93 представлен его патент (1930). Нужно разрезать непроводящее основание 10 (например, стекло) и вставить тонкую металлическую полоску 13. Толщина этой полоски должна составлять «одну десятитысячную часть дюйма». На поверхность на минимально возможном расстоянии крепятся два металлических электрода 11 и 12 и наносится слой

вещества 15, «в качестве элемента однонаправленной проводимости». Лиленфельд не употреблял термин полупроводник, который стали использовать позже. Веществом с однонаправленной проводимостью во времена Лиленфельда могли быть оксиды или соли металлов (например,  $CuS$ ). Более подробное расположение электродов и полупроводника показано на рис. 94. Между электродами нужно подать значительное напряжение от источника 17 через провода 16. По замыслу Лиленфельда ввиду малости зазора между полоской 13 и электродом 11 там возникнет сильное электрическое поле, которое будет управлять движением электронов в «веществе с однонаправленной проводимостью» 15 между электродами. При подаче на полосу 13 через провод 14 сигнала (например, с микрофона), электрическое поле в зазоре будет меняться, что вызовет значительное изменение тока через электроды 11 и 12. Это изменение можно будет регистрировать с помощью трансформатора 21.

Патент Лиленфельда остался только на бумаге. Однако его идея усиления сигнала путём создания узкого зазора между контактами оказалась в целом правильной. Заметим, что Лиленфельд не был мечтателем, у него было более 60 патентов. Самое известное его изобретение – это применяемые и в наши дни электролитические конденсаторы. Но в его время не было ещё необходимых материалов. В 1920-ые годы активно развивалась электроника на радиолампах и исследование полупроводниковых приборов усиленно не финансировалось. Поэтому идеи Лиленфельда не получили развития, также, как и



*Олег Владимирович Лосев  
(1903 – 1942)*



*Рис. 92. Приёмник Лосева  
«кристадин», Нижегородский музей*



*Юлий Эдгар Лиленфельд  
(1882 – 1963)*

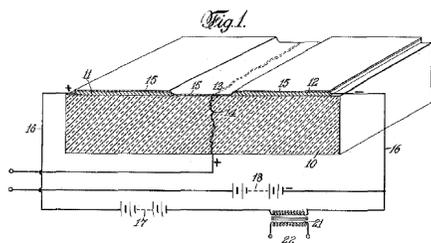


Рис. 93. Патент Лилленфельда

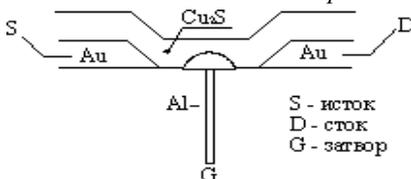


Рис. 94. Расположение полупроводника (CuS) крупным планом

ры располагались на суше и имели огромные размеры. Но военным была нужна более совершенная техника, они хотели ставить радары на танки и самолёты, а для этого радары должны были иметь небольшие размеры.

Размер радара напрямую зависит от длин волн используемых радиоволн. Чтобы установить радар на самолёт, длина волны не должна превышать нескольких дециметров. Но для работы на длине волны в 30 см нужна частота передатчиков в гигагерц (миллиард колебаний в секунду). Электронные лампы могли принимать и обрабатывать сигналы частотой в тысячи и даже миллионы герц, но с гигагерцовыми частотами лампы уже не справлялись. Поскольку задача имела военное приложение, то поиски кристаллических детекторов усиленно финансировались.

В 1930-ые годы начали появляться и теоретические работы, объясняющие проводимость полупроводников на основе квантовой механики. Большую роль в развитие теории полупроводников внесли советские учёные: Абрам Федорович Иоффе (1880 – 1960), Яков Ильич Френкель (1894 – 1952), Александр Сергеевич Давыдов (1912 – 1993). Однако теория не могла объяснить все наблюдаемые эффекты.

похожие идеи немецкого физика Оскара Хайля (*Oskar Heil*, 1908 – 1994). Однако, в 1930-ые годы возникла отрасль радиотехники, в которой радиолампы оказались непригодными. Появились радары.

Сам принцип работы радаров не был новым. Отражение электромагнитных волн от металлов наблюдал ещё Генрих Герц, а в 1897 году А.С. Попов обнаружил отражение радиоволн от корабля. Но от идеи до инженерных решений была огромная дистанция и мощные радары, пригодные для обнаружения вражеских кораблей, самолётов и др. целей, появились только в 1930-ые годы. Вначале локаторы



*Абрам Федорович Иоффе  
(1880 – 1960)*



*Яков Ильич Френкель  
(1894 – 1952)*



*Александр Сергеевич  
Давыдов (1912 – 1993)*



*Лаикар'ев Вадим Евгеньевич  
(1903 – 1974)*

В 1927 годах американские изобретатели Грэндал и Гейгер создали диод из меди, соединённый с закисью меди (рис. 95). Закись меди получается при обжиге меди. Много позже выяснилось, что наружный слой закиси меди и слой на границе с медью имеют разные электрические свойства, образуя так называемый *p-n* переход, о котором речь впереди. Но тогда причина односторонней проводимости тока осталась неясной. В СССР

Лашкарёв Вадим Евгеньевич (1903 – 1974) также изучал свойства медно-кислого диода и внедрил его в производство. Он установил роль примесей на наблюдаемый эффект односторонней проводимости и остановился всего в одном шаге, чтобы открыть *p-n* переход.

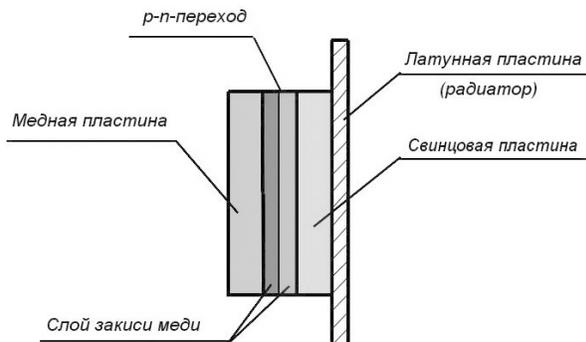


Рис. 95. Диод на основе меди и окиси меди

В 1938 году американская компания *Bell Labs*, основанная ещё изобретателем телефона Александром Беллом (*Alexander Bell*; 1847 – 1922), заключила с военным флотом контракт на разработку управляющего огнём радара в диапазоне радиоволн 40 см. Руководителем научных работ был Мервин Келли (*Mervin Kelly* 1895 – 1971), впоследствии – президент *Bell Labs*. Радиолампы для таких частот не подходили, и наилучшим приёмников сигналов высокочастотных радаров в то время был созданный Пикардом ещё в 1906 году «кошачий ус».



Рассел Ол (1898 – 1987)

К сожалению, «кошачий ус» работал нестабильно. Электрохимику Расселу Олу (*Russell Ohl*, 1898 – 1987) было предложено улучшить стабильность работы кристаллического детектора.

Рассел правильно предположил, что дело было в степени очистки кремния и в 1939 году разработал технологию выращивания кристаллов с содержанием примесей менее 0,2%. Но, получив относительно чистые кристаллы, Рассел обнаружил новый непонятный эффект:

одни кристаллы проводили ток в одном направлении, а другие – в другом, причём направление не удавалось определить до того, как кристалл был изготовлен. В зависимости от направления проводимого тока кристаллы получили названия  $p$  (*positive* – положительный) и  $n$  (*negative* – отрицательный).

Проводя бесчисленные опыты, в 1939 году Рассел случайно (!) обнаружил, что сопротивление одного из кристаллов кремния сильно изменяется при освещении светом. Это было странно, поскольку сопротивления других кристаллов кремния не менялись при освещении. Присмотревшись, Рассел обнаружил трещины посередине кристалла.

Конечно, Расселу крупно повезло. Как мы уже не раз отмечали, что одного везенья было мало. Рассел долго и кропотливо изучал свойства полупроводников, и он был готов увидеть новое. Он не выкинул странный кристалл с трещинами, а тщательно его изучил. Важно и другое – он правильно понял, что необычные свойства кристалла кремния связаны с трещинами, а трещины – с вкраплением примесей. Детальное исследование необычного кристалла показало, что по разные стороны трещин были различные примеси. Фактически был открыт  $p$ - $n$  переход, который мы подробнее разберём ниже. По настоянию руководителя работ Мервина Келли эти открытия были засекречены до конца войны и компания поставляла только  $p$  – кристаллы. Только после войны в 1946 году Рассел запатентовал основанные на открытом им явлении солнечные батарейки, которые используются и сегодня.

Таким образом, солнечные батарейки были созданы случайно при решении совсем другой задачи – создания детектора для радаров. Принцип их работы мы разберём чуть позже, когда дойдём до  $p$ - $n$  перехода.

Нужно заметить, что вторая мировая война сильно стимулировала развитие техники. В 1940 году премьер министр Великобритании Черчилль пошёл на беспрецедентный шаг и передал США передовые научные разработки с целью использования промышленного потенциала Америки и скорейшего их внедрения в производство. Миссию возглавил английский учёный Генри Томас Тизард (*Henry Thomas Tizard*, 1885 – 1959). В частности, был передан созданный в 1940-м году в Бирмингемском университете резонансный магнетрон для радаров, создающий мощный и точно настроенный луч микроволн. В результате Британско-американского сотрудничества были созданы компактные радары, которые устанавлива-

лись на самолёты и позволяли обнаруживать подводные лодки, даже если сами лодки были под водой, а над водой высовывался только перископ.

Необходимость использовать полупроводники для военных целей стимулировало развитие технологии их очистки. Если в начале войны кремний и германий очищали до 99%, то к концу войны делали кристаллы 99,999% чистоты, т.е. не более одной частицы примеси на 100 000 атомов кремния (или германия). Одновременно изучалось влияние примесей на электрические свойства кристаллов.

После войны полученные знания были частично рассекречены и стали использоваться для создания усилителя на полупроводниках.

В 1945 году Мервин Келли сформировал отдел по исследованию полупроводников. Туда вошли Уильям Шокли (*William Shockley*; 1910 – 1989), Уолтер Бреттейн (*Walter Brattain*; 1902 – 1987), Джон Бардин (*John Bardeen*, 1908 – 1991). Всего к научным разработкам было привлечено более 2000 (!) учёных. Было перепробовано огромное количество полупроводников, диэлектриков, способов подключений.

Вначале Шокли попытался сделать усилитель на основе эффекта индукции. Этот эффект мы разбирали выше. Если поднести к металлической палочке или сфере положительный заряд, то электроны перемещаются по металлу и на её концах индуцируются отрицательный и положительный заряды. Шокли решил использовать этот эффект для полупроводников. Он помещал металлическую пластину над полупроводником на расстоянии доли миллиметра. По его задумке приложение напряжения (положительного заряда) к пластине должно было притянуть избыток электронов на поверхность кристалла, которые могли стать проводниками электрического тока. Малые изменения напряжения на электроде таким способом могли сильно изменять ток в выходной цепи. Идея была обоснована теоретически, подтверждена расчётами и была всем хороша за одним исключением – собранное устройство не работало.

Шокли занялся дальнейшей разработкой теории полупроводников, а Джон Бардин и Уотер Бреттейн попытались собрать два «кошачьих уса», максимально приблизив их друг к другу. Путём множества проб и ошибок в декабре 1947 года они создали первый работающий усилитель, внешний вид которого показан на рис. 96. Они собрали его, как говорится, на коленке. Бреттейн наклеил на пластмассовую треугольную призму кусочек золотой фольги и аккуратно разрезал фольгу у вершины призмы

бритвой. Получилось два контакта, расстояние между которыми было менее 0,05 мм. Затем их пружинкой прижали к кристаллу германия. Когда подключили питание, то ток через один контакт стал индуцировать ток во втором контакте. Вершина треугольной призмы между кусочками фольги не давала им соприкоснуться, т.е. служила изолятором. Полученное устройство получило название транзистор (англ. *transistor* от *transfer* – передача и *varistor* – переменное сопротивление). Он смог усилить сигнал частотой 1000 герц в 100 раз (по напряжению).

И здесь мы сталкиваемся ещё с одной важной проблемой изобретений – нужно быть первым. Говорят, что «идеи летают в воздухе». Практически такую же конструкцию на полгода позже, но до опубликования работ Бардина и Браттейна, собрали по другую сторону Атлантики под Парижем немецкие физики Герберт Матаре (*Herbert Mataré*, 1912 – 2011) и Генрих Велкер (*Heinrich Welker*, 1912 – 1981). Его вид показан на рис. 97. По сути – это два соединённых диода, расстояние между ножками которых составляло сотые доли миллиметра.

Создав транзистор, авторы не до конца понимали физические основы его работы. В декабре 1947 года Шокли ускорил свои теоретические работы. Его подстёгивало желание разделить славу с Бардиным и Бреттейном, которым он завидовал. К февралю 1948 года он представил свои результаты на семинаре в *Bell Labs*. Шокли два месяца никому не говорил о своих расчётах, что было нарушением кодекса поведения *Bell Labs*. Тем не ме-

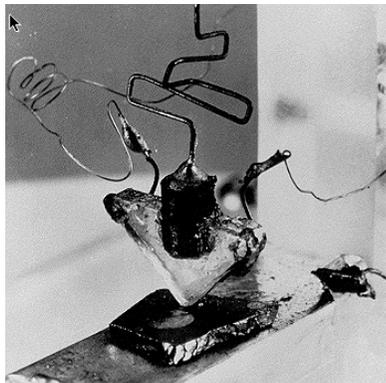


Рис. 96. Транзистор Бреттейна и Бардина



Рекламная фотография 1948 года – Джон Бардин, Уильям Шокли и Уолтер Бреттейн

нее, на основе его расчётов был создан плоскостной (а не точечный, как у Бардина и Бреттейна) транзистор.

Летом 1948 года *Bell Labs* подал патентную заявку на изобретение транзистора, но теория была опубликована только через год, а в 1950 году вышла книга Шокли «Теория электронных полупроводников».

В 1956 году Джону Бардину, Вильяму Шокли и Уотеру Бреттейну была присуждена Нобелевская премия.

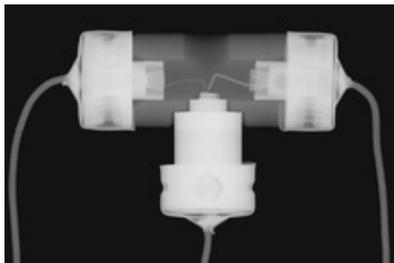


Рис. 97. Транзистор Матаре и Велкера (рентгенограмма)

## ПРИНЦИП РАБОТЫ ДИОДА

Рассмотрим принцип работы диода в соответствии с современными представлениями.

Чистый кремний и германий образуют кристаллическую решётку в виде тетраэдров, как показано на рис. 98. Заметим, что такую же решётку образуют атомы углерода в алмазе.

Чтобы образовать связь два атома «обмениваются» электронами, т.е. образуется пара из двух электронов, которые принадлежат сразу двум атомам. Это напоминает, как родители берут детей за руку, когда хотят, чтобы те были рядом, или дети берутся за руки во время прогулки, чтобы не потеряться. У человека только две руки, поэтому он может протянуть руки только двум соседям. У осьминога восемь щупалец, поэтому он мог бы протянуть их восьми другим осьминогам. Число электронов, которые атом может дать для образования связи называются *валентностью* (от лат. *valens* – имеющий силу). Кремний и германий являются четырёхвалентными элементами, т.е. они

способны образовать четыре связи с соседними атомами. Далее мы будем говорить про кремний, но всё то же самое относится и к германию. Углерод также является 4-х валентным элементом, но он хорошо проводит электричество и не годится для создания транзистора.

Работать с объёмными изображениями неудобно. Поэтому далее мы будем рисовать кристаллическую решётку на плоскости, при этом каждый атом кремния (химическое обозначение –  $Si$ ) будет связан с 4-мя другими атомами, как показано на рис. 99.

Проводимость самого кремния очень низкая. Но наличие даже небольшого количества примесей сильно изменяет его проводимость. Представим себе, что в решётке оказался атом фосфора ( $P$ ), имеющий валентность пять, то есть, пять его электронов могут образовывать связи с соседними атомами. Четыре его электрона создадут связи с 4-мя соседними атомами кремния, как показано на рис. 100. А что делать 5-му электрону?

Здесь получается то, что никто раньше и представить не мог. Оказывается, энергетически выгодно фосфору отдать «лишний» электрон соседнему атому, но сохранить целостность кристаллической решётки. Что будет делать атом кремния с этим «лишним» электроном? Он тоже захочет его отдать соседу... (рис. 101). В результате получится, что «лишний» электрон может почти свободно «гулять» по всей решетке. Наличие даже небольшого числа таких свободных электронов (порядка один атом примеси на 100 000 атомов кремния) значительно увеличит проводимость решётки. Впрочем, проводимость кремния с примесями всё равно будет

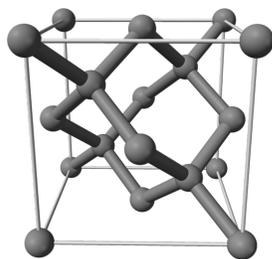


Рис.98. Кристаллическая решётка кремния

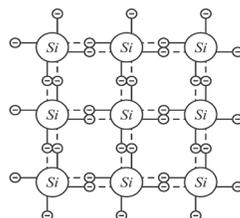


Рис. 99. Двумерное изображение решётки кремния

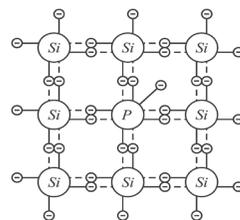


Рис. 100. Атом фосфора ( $P$ ) в решётке кремния ( $Si$ )

намного хуже, чем у металлов. Кристалл с 5-ти валентной примесью называется кристаллом *n*-типа от английского *negative* (отрицательный), поскольку электрон имеет отрицательный заряд.

Важно заметить, что, несмотря на свободные электроны, кристалл *n*-типа остаётся электрически нейтральным, поскольку, отдавая электрон, атом фосфора становится положительно заряженным ионом, и число свободных электронов равно числу положительно заряженных ионов фосфора.

Теоретически рассчитать такое движение свободных электронов оказалось очень сложной задачей, а экспериментально проверить влияние примесей стало возможно только после того, как научились получать очень чистые кристаллы кремния (не более одного атома примеси на 100 000 атомов кремния).

А что будет, если в решётке оказался трёхвалентный атом индия (*In*) или алюминия (*Al*)? Три его электрона создадут связи с 3-мя соседними атомами кремния, как показано на рис. 102. Но теперь атом кремния остался без связи (на рис. 102 отсутствие связи обозначено белым кружочком). Может, вы подумали, что атом кремния захочет отдать «лишний» электрон? Всё гораздо хитрее. Оказывается, энергетически выгодно сохранить целостность кристаллической решётки, а для этого атому алюминия нужно отобрать электрон у соседнего атома, чтобы установить связь со всеми 4-мя соседями.

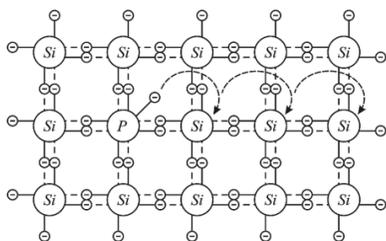


Рис. 101. Кристалл *n*-типа

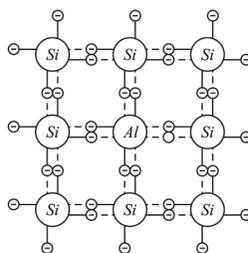


Рис. 102. Кристалл *p*-типа

Если в кристаллической решетке с примесью фосфора гулял «лишний» электрон, то в кристаллической решетке с примесью алюминия будет гулять «недостаток» электрона. Принято называть такой недостаток «дыркой», а кристалл с примесью алюминия называется *p*-типа от английского *positive* (положительный), поскольку движение

«недостатка» электрона можно трактовать, как движение положительной дырки. Заметим, что кристалл  $p$ -типа является электрически нейтральным.

Сложность создания диода и транзистора была ещё и в том, что отличить кристалл  $n$ -типа от кристалла  $p$ -типа не так просто. Каждый кристалл в отдельности ведёт себя как обычное сопротивление. А «чудеса» начинаются при контакте кристаллов  $n$  и  $p$ -типов. Если соединить два кристалла  $n$  и  $p$ -типов, то «лишние» электроны с кристалла  $n$ -типа начнут переходить и занимать места «дырок» на кристалле  $p$ -типа. Но переходить они будут очень недолго, поскольку на кристалле  $n$ -типа быстро образуется положительный заряд, а на кристалле  $p$ -типа – отрицательный, как показано на рис. 103. Получается очень тонкий заряженный слой – шириной всего в несколько слоёв кристаллической решётки. Образовавшийся заряженный слой будет препятствовать дальнейшему переходу электронов на кристалл  $p$ -типа. Этот тонкий слой называется  $p$ - $n$  переходом.

Контакт двух кристаллов  $p$  и  $n$ -типов обладает односторонней проводимостью, т.е. является диодом. Рассмотрим, почему ток может идти только в одну сторону.

Что произойдёт, если приложить к кристаллу  $p$ -типа положительное напряжение, а к кристаллу  $n$ -типа – отрицательное (рис. 103)? Электроны от источника напряжения дойдут до кристалла  $n$ -типа, заполнят недостаток электронов, в  $p$ - $n$  переходе, а избыток электронов из кристалла  $p$ -типа уйдёт к источнику напряжения. Таким образом, заряженный слой нейтрализуется и через диод пойдёт ток. Такое включение называется *прямым*.

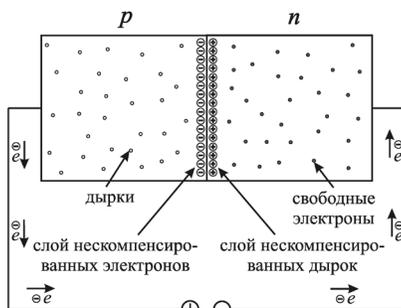


Рис. 103.  $p$ - $n$  переход

Что произойдёт в случае, если приложить напряжение в обратном направлении: к кристаллу  $p$ -типа – отрицательное, а к кристаллу  $n$ -типа – положительное? Электроны от источника напряжения дойдут до кристалла  $p$ -типа, и встретятся с электронами в  $p$ - $n$  переходе, а из кри-

стала  $n$ -типа часть электронов уйдёт к источнику напряжения. Таким образом, заряженный слой только увеличится и ток через диод не пойдёт. Такое включение называется *обратным*.

Почему односторонней проводимостью обладают контакты медь-закись меди и др.? Здесь механизм не так нагляден, как в  $p$ - $n$  переходе. У металлов высокая электропроводность. Это вызвано тем, что металл содержит огромное количество свободных электронов, которые могут свободно перемещаться. У оксидов проводимость малая, электроны прочно «привязаны» к своим атомам. На границе металл-оксид возникает своего рода  $p$ - $n$  переход. Металл с его избытком свободных электронов играет роль кристалла  $n$ -типа.

## СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ

Понимание механизма работы  $p$ - $n$  перехода позволяет разобраться с работой солнечных батарей. Солнечные батареи могут иметь различное строение, но принцип их работы не меняется. В простейшем случае они состоят из металлической сетки, слоя  $n$ -типа, слоя  $p$ -типа и второго проводника (рис. 104). При попадании света на полупроводник, он сообщает электронам энергию, достаточную для преодоления  $p$ - $n$  перехода. В результате возникает напряжение и идёт ток.

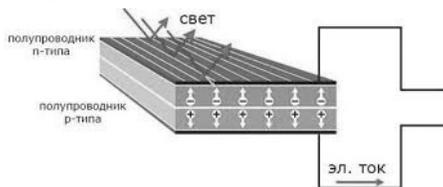


Рис. 104. Строение солнечного элемента

## ТРАНЗИСТОР

У транзистора три контакта, которые называются эмиттер (Э), база (Б) и коллектор (К). Области  $p$  и  $n$ -типа расположены так, что транзистор по сути представляет собой два включённых навстречу диода (рис. 105, сверху). Если между эмиттером и коллектором подать напряже-

ние (с любой полярностью), а на базу напряжение не подавать, то ток не пойдёт.

Эмиттер и база представляют собой обычный диод. Если между эмиттером и базой подать напряжение в «прямом» направлении, то между ними пойдёт ток (рис. 105, снизу).

Основная «хитрость» транзистора заключается в том, что база очень тонкая. Когда потечёт ток между эмиттером и базой, то электроны заполняют «дырки» не только в левом  $p$ - $n$  переходе, но и в правом  $p$ - $n$  переходе. Оба заряженных слоя на месте контакта областей  $p$  и  $n$ -типа будут нейтрализованы и дорога для тока через коллектор будет открыта (рис. 105, снизу).

Поскольку база очень узкая, даже маленький ток через базу способен нейтрализовать все «дырки» в  $p$ - $n$  переходах и открыть дорогу большому току через коллектор. Таким образом, маленький ток может управлять большим. Мы получили усилитель.

Работу транзистора можно уподобить механическому «водопроводу». На рис. 106 показан механический аналог транзистора. Верхний сосуд К – это аналог коллектора транзистора, через который в транзистор входит ток, а в механическую модель – вода. Но воде мешает течь заглушка, которую можно открыть небольшим потоком воды из крана Б. Небольшой поток воды из крана Б соответствует небольшому току через базу транзистора. В результате небольшие изменения потока воды через кран Б вызовут сильное изменение потока воды из верхнего сосуда в нижний, а в реальном транзисторе небольшой ток через

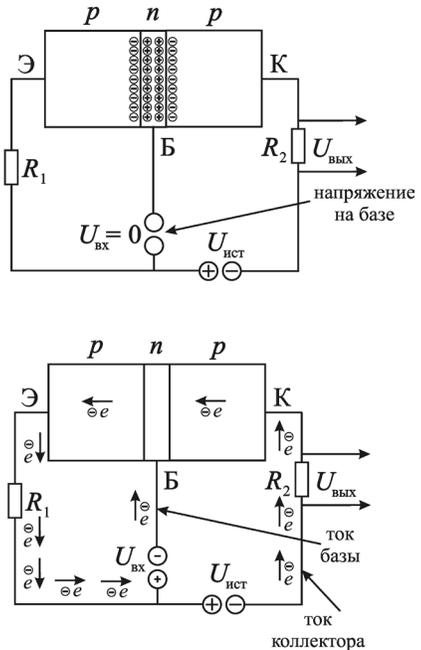


Рис. 105. Принцип работы транзистора

базу будет заметно влиять на ток от эмиттера к коллектору.

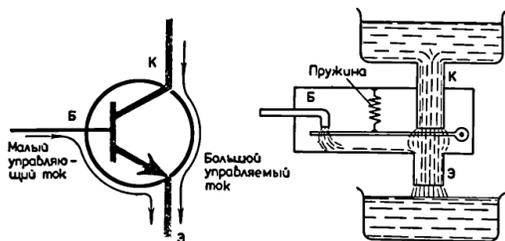


Рис. 106. Механическая модель работы транзистора

Остаётся понять, почему работал «золотой» транзистор Бардина-Бреттейна. Как ни парадоксально это звучит, принцип работы «того самого» первого транзистора остаётся непонятным. Наиболее правдоподобная версия – это наличие примесей в золотой фольге и в германиевой пластине. Из-за примесей на месте контакта золотой фольги и германиевой пластины могло образоваться два  $p-n$  перехода. К сожалению, проверить это невозможно, поскольку оригинал первого транзистора не сохранился.

## ИТОГИ VII ГЛАВЫ

Приближение Второй мировой войны стимулировало создание радаров. Для радаров были нужны полупроводники, поэтому продолжились работы по исследованию полупроводников, что привело к созданию транзисторов и появлению теоретического обоснования их работы. Началось активное развитие радиотехники, основанной на транзисторах. Но мы уделим внимание не столько разнообразным изобретениям на основе транзисторов – их слишком много, а тому, как транзисторы из сантиметровых стали миллиметровыми, микронными, а затем достигли размеров, которые нам и представить сложно.

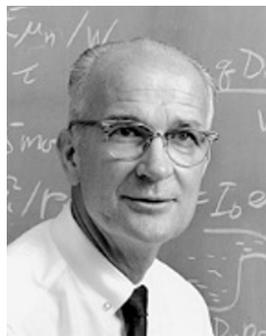
## ГЛАВА 8. ОТ МИЛЛИМЕТРОВ К НАНОМЕТРАМ

*Реклама – это средство заставить людей надеяться в том, о чём они раньше не слышали.*

*Мартти Ларни (финский писатель)*

Кто движет научно-технический прогресс? Гении – одиночки или коллективы исследователей? В истории известны примеры и того и другого. Впрочем, если сделать научное открытие может один человек, то наладить производство один человек не в состоянии. Если идея не воплощена в жизнь, то об авторе могут вспомнить только историки науки. Учёные часто являются мечтателями, а для производства нужны прагматики – организаторы. То есть нужен коллектив, состоящий из учёных, инженеров, менеджеров... Но коллективом нужно руководить. И успешность работы во многом определяется умением руководить людьми.

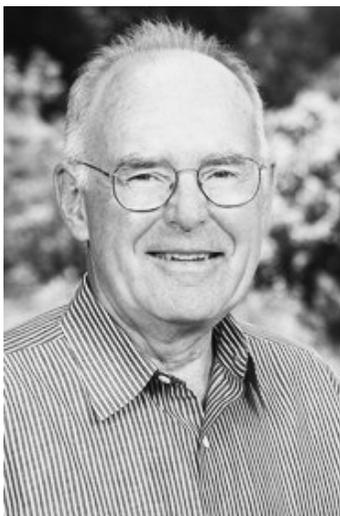
Шокли можно считать классическим примером того, как НЕЛЬЗЯ руководить. Изобретя транзистор, он счёл, что только он один может работать над транзистором, а остальные должны только реализовывать его, Шокли, идеи. Бардин в 1951 году ушёл из *Bell Labs* в университет Иллинойса. Будучи прекрасным теоретиком в области квантовой физики, он занялся сверхпроводимостью и получил вторую Нобелевскую премию в 1976 году совместно с Леоном Купером (*Leon Cooper*, род. 1930) и Робертом Шриффером (*John Robert Schrieffer*, род. 1931). Таким образом, Бардин стал единственным человеком, получившим две Нобелевские премии по физике. Бреттейн также не захотел работать с Шокли и занялся электрохимией. Обстановка в лаборатории стала невыносимой, но Шокли считал, что все его недооценивают, как гения, и в 1955 году перешёл на работу в фирму *Beckman Instruments*. Как несложно догадаться из названия руководил фирмой Бэкман. Шокли настоял, что производство транзисторов нужно организовать в его родном маленьком городке. Сейчас мы знаем это место как Силиконовую долину.



*Уильям Шокли  
(1910 – 1989)*



*Роберт Нортон Нойс  
(1927 – 1990)*



*Гордон Эрл Мур (род. 1929)*

Шокли нужно было набирать команду. Никто из прежних коллег из *Bell Labs* не захотел работать с Шокли, его там слишком хорошо знали. Но после выхода своей книги о транзисторах Шокли был хорошо известен, и он быстро набрал команду молодых инженеров из разных концов США. Все они были моложе 30 лет и имели прекрасное образование. Среди них были Роберт Нортон Нойс (*Robert Norton Noyce*, 1927 – 1990) и Гордон Эрл Мур (*Gordon Earle Moore*, род. 1929).

Казалось бы, что после получения в 1956 году Нобелевской премии Шокли мог купаться в славе и спокойно руководить работой. Но Шокли, подобно старухе из сказки Пушкина, хотелось непременно быть «владычицей морской». Шокли был скрытным, жёстким, авторитарным и чрезмерно подозрительным, считал, что все его пытаются обмануть. Он ввёл обстановку секретности и запрещал сотрудникам обсуждать свои результаты даже внутри лаборатории. Своих сотрудников он считал своими конкурентами, требовал, чтобы его указывали как соавтора во всех патентах. В юности Шокли показал средние результаты при прохождении интеллектуальных тестов. Вместо того, чтобы усомниться в самой процедуре тестирования, он создавал новые тесты и заставлял сотрудников их проходить. Когда его секретарша поранила руку при открывании двери, он счёл это актом саботажа и потребовал, чтобы сотрудники прошли тест на детекторе лжи. Только

когда свободолюбивые американцы дружно отказались это сделать, Шокли отступил.

Обстановка в фирме стала настолько нетерпимой, что в 1957 году Гордон Мур и еще несколько инженеров обратились к руководителю фирмы Бэкману с предложением отстранить Шокли от научного руководства. Несложно представить себя на месте Бэкмана. С одной стороны – Нобелевский лауреат, с другой – несколько молодых, талантливых, но никому неизвестных молодых инженеров. Бэкман попытался их примирить, но, когда это не удалось, сделал выбор в пользу Шокли. Позже он жалел об этом, но кому дано предвидеть будущее? Гордон Мур, Роберт Нойс и еще 6 инженеров нашли спонсоров и основали новую фирму *Fairchild Semiconductor*. Шокли так и не сумел наладить производство транзисторов, через несколько лет ушёл из бизнеса и стал преподавателем Стэнфордского университета. У него появилось новое пристрастие – он стал изучать умственные способности людей, пришёл к выводу, что умственные способности передаются по наследству и умственные способности белых лучше, чем у негров. Теории Шокли были объявлены расистскими и привели к его изоляции в научном сообществе.

Тем временем Гордон Мур и Роберт Нойс почувствовали, что методы управления фирмой *Fairchild Semiconductor* не соответствуют современному уровню, и в 1968 году основали совместно с бизнесменом Эндрю Стивенсом Гроувом (*Andrew Stephen Grove*, 1936 – 2017) новую фирму – *Intel*. Успешность фирмы *Intel* сомнений не вызывает.

Чем руководство фирмами *Bell Labs*, *Intel* и многими другими успешными фирмами отличались от методов руководства Шокли? О руководстве фирмами можно написать отдельную книгу (и таких книг написано немало), выделим основные моменты.

В научном отделе *Bell Labs* было собрано большое число специалистов из разных областей науки и техники: физики-теоретики, инженеры-электронщики, химики... и др. Особое внимание уделялось личным контактам сотрудников. Считалось, что именно при личных встречах и обсуждении проблем возникают идеи как их решать, и никакая переписка и др. виды общения не могут их заменить. Поэтому все научные сотрудники помещались в одном здании, изолированных отделов не было, но было множество длинных коридоров, и, проходя, по ним, сотрудники постоянно встречались и могли что-то обсудить. Рабочие столы помещались в

больших комнатах, даже у руководителей подразделений не было отдельных кабинетов, причём у руководителей столы не отличались по качеству от остальных сотрудников. На всех уровнях поощрялись любые идеи и предложения, в том числе от молодых сотрудников. Руководство понимало, что нельзя почитать на лаврах, нужно всё время развиваться, иначе конкуренты создадут более совершенную технику, и фирма останется в проигрыше.

От менеджеров компаний требуются решения, которые порой по своей оригинальности и новизне не уступают изобретательности инженеров. Вернёмся к моменту изобретения транзистора.

Первые транзисторы отличались малой надёжностью. Это спасло новое изобретение, ведь была холодная война, военные могли засекретить транзисторы и использовать только для своих нужд. Нужно было разрабатывать технологию их производства. Но антимонопольное ведомство США предписало *Bell Labs* продать патенты на транзистор другим фирмам. Патенты были проданы нескольким фирмам по смешной цене – \$25 000. Среди покупателей была фирма *Texas Instruments*, которая до того времени занималась в основном нефтяным бизнесом. В 1952 году *Texas Instruments* начинает массовое производство плоскостных транзисторов. Транзисторы в то время стоили немало – \$16. Уменьшить цену можно было увеличив объём производства. Перед руководством компании встала проблема рынка сбыта. Вице-президент компании Патрик Хаггерти (*Patrick Eugene Haggerty*, 1914 – 1980) понимает, чтобы получить прибыль, нужно придумать товар из транзисторов, которого не было, но который всем бы захотелось иметь.

Хаггерти придумывает гениальное решение: он даёт задание инженерам разработать портативные карманные радиоприёмники. До этого радиоприёмники были на радиолампах, они требовали подключения к электросети или к огромным по размерам аккумуляторам. Они были громоздки, стояли в гостиных или общественных местах. Транзисторы потребляли гораздо меньше энергии, что позволяло питать радиоприёмники от маленьких батареек. Эти приёмники были бы индивидуальными. В 1954 году транзисторный приёмник Regency TR-1 поступил в продажу (рис. 107).

Транзисторные приёмники пользовались большой популярностью у молодёжи, которая теперь могла слушать свои любимые рок-программы,

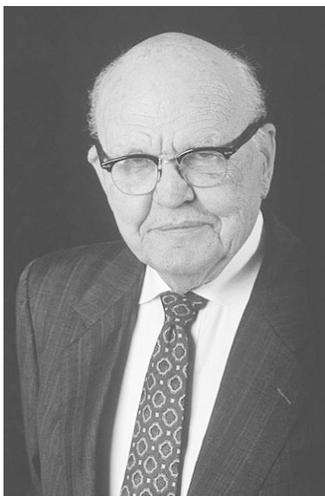
не оглядываясь на запреты родителей. Реклама не обошла военную тему, она призывала покупать миниатюрные приёмники на батарейках, чтобы в случае ядерной войны быть в курсе событий (при ядерной войне все электростанции и электросети могут быть разрушены). Только за 1954 год было продано более 100 000 транзисторных приёмников. Цена на транзисторы упала с \$16 до \$3.

Следующий прорыв в микроэлектронике происходит через 5 лет. Развитие электроники затормозилось из-за проблем с контактами. Чем больше в схеме транзисторов, тем больше нужно контактов между ними, но контакты со временем окисляются, что приводит к проблемам в работе. Частично проблема с контактами решается использованием золотых (позолоченных) проволочек, поскольку золото не окисляется. Но всё равно возникает проблема, что для соединения деталей нужны десятки и сотни золотых проволочек. Кроме того, со временем может загрязняться и сам  $p-n$  переход.

Выход был в размещении нескольких транзисторов на одном кристалле кремния (или германия). Идеи витают в воздухе. Еще в 1952 году британский инженер Джеффри Даммер (*Geoffrey Dummer*, 1909 – 2002) публично высказал такую возможность, но не смог найти средств для реализации своей идеи, министерство обороны Великобритании сочло создание таких систем неперспективными. Практически решить проблемы размещения транзисторов на одном кристалле и создать первые *микрочипы* смогли только через 7 лет практически одновременно две наиболее быстро развивающиеся американские фирмы: *Texas Instruments* и *Fairchild Semiconductor*. Первым в феврале 1959 года подал заявку Джек Килби (*Jack Kilby*, 1923 – 2005) из *Texas Instruments*. В июле того же 1959 года заявку подают Роберт Нойс и Джин Хорни (*Jean Hoerni*, 1924 – 1997) из *Fairchild*. При этом в заявке от *Fairchild* была новая идея – размещать контакты непосредственно на кристалле (металлизация алюминием) и



Рис. 107.  
Транзисторный  
приёмник Regency TR-1



Джек Килби (1923 – 2005)



Рис. 108. Электроника БЗ-18 (СССР)

покрывать поверхность плёнкой из окиси кремния для предотвращения окисления контактов.

Патентная война между этими фирмами заканчивается мировым соглашением 1966 года, все последующие патенты должны были содержать ссылки на патенты обеих фирм. Научная значимость создания микрочипов была оценена только через 40 лет, при этом Нобелевскую премию получил только Килби в 2000 году.

И снова встаёт проблема рынка сбыта микрочипов. Военные ставят микрочипы в головки ракет, но нужно найти и гражданское применение. Микрочипы используют для слуховых аппаратов, но этого мало. Патрик Хаггерти, теперь уже президент компании *Texas Instruments*, снова проявляет чудеса изобретательности и придумывает товар из микрочипов, которого не было, но который всем бы захотелось иметь. Он даёт задание инженерам разработать персональные карманные калькуляторы. Калькуляторы, которые теперь есть в кармане каждого школьника, впервые появляются в 1967 году усилиями инженеров *Texas Instruments*. Конечно, они не были похожи на современные. Они могли выполнять только 4 арифметических действия, весили 1 кг (!), и стоили \$150. Но Хаггерти рассчитал точно. Калькуляторы сразу начали пользоваться огромным спросом, и за 5 лет было продано 5 000 000 калькуляторов. Позже калькуляторы научили вычислять синусы, логарифмы и др. функции.

На рис. 108 представлен наиболее мас-

совый в 1970-е годы отечественный калькулятор «Электроника БЗ-18». Обратите внимание, что у него экран не жидкокристаллический, как у современных калькуляторов, а состоит из светящихся полосок, которые составляют цифры от 0 до 9.

В 1959 году делается ещё одно изобретение, важность которого осознаётся только спустя десятилетие. *Bell Labs* продолжает разработки в области полупроводников. Два её инженера Мартин Джон Аталла (*Martin John Atalla*, 1924 – 2009) и Дэвон Канг (*Dawon Kahng*, 1931 – 1992) создают новый тип транзисторов. Эти транзисторы получили название МДП (металл – диэлектрик – полупроводник) или МОП (металл – оксид – полупроводник, оксид кремния выступает в роли диэлектрика – изолятора), английская аббревиатура *MOS* (*metal – oxide – semiconductor*) или более полно *MOSFET* (*metal – oxide – semiconductor field-effect transistor*).

Существует несколько видов *MOSFET* транзисторов. Принципиальное устройство одного из них показано на рис. 109. Транзистор имеет три контакта, которые обозначаются исток (*S – Source*), сток (*D – Drain*) и затвор (*G – Gate*). Вблизи стока и истока кристаллы *n* – типа. В обычном состоянии транзистор представляет собой два включенных навстречу друг другу диода (*p – n* и *n – p*), и ток от истока к стоку идти не может (рис. 109, слева). При подаче напряжения на затвор создаётся поле, которое воздействует на электроны, и возникает узкий канал с *p* – проводимостью (рис. 109, справа). Чем больше напряжение, тем шире канал, тем больший ток может идти от истока к стоку. Фактически в МОП – транзисторах была реализована идея Лиленфельда, который, разумеется, не знал о *p* и *n* слоях.

Преимущество МОП – транзисторов в том, что они управляются полем, т.е. ток через затвор практически не течёт. Сверху *p-n* переход закрыт изолятором – оксидом кремния (*SiO<sub>2</sub>*). Входное сопротивление транзисторов достигает  $10^{14}$  Ом (!), т.е. его можно считать бесконечным. Однако руководство *Bell Labs* не оценило новое изобретение. Недостатками МОП – транзисторов были относительно малое быстродействие и меньшая надёжность, чем у обычных транзисторов.



Дэвон Канг  
(1931 – 1992)

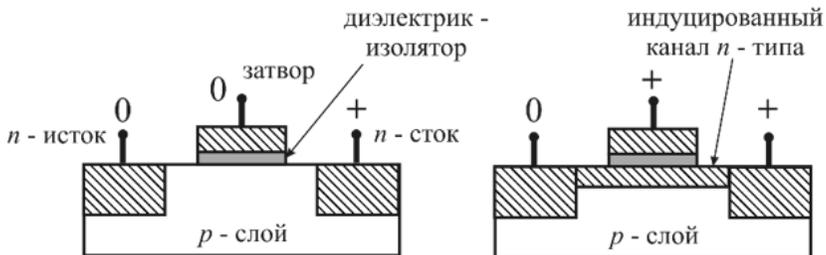


Рис. 109. МОП - транзистор

В 1963 году Фрэнк Вонлас (*Frank Marion Wanlass*, 1933 – 2010) из *Fairchild Semiconductor* обнаружил, что параллельное использование МОП транзисторов  $p$  и  $n$  типов в миллион (!) раз уменьшает потребление энергии в режиме, когда транзисторы не переключаются. Такое соединение получило название КМОП (комплементарная (структура) МОП), английская аббревиатура *CMOS* (*complementary metal – oxide – semiconductor*). Между открытием и внедрением всегда лежит большая дистанция, и первые КМОП микрочипы появились в 1968 году. Из-за малого быстродействия вначале они использовались, в основном, в часах, где было важно энергосбережение, а не быстродействие. Но в 1970-ые годы увеличение количества транзисторов в микрочипах привело к росту потребляемой энергии. Поэтому более экономные КМОП микрочипы стали вытеснять чипы на обычных транзисторах. К 1990-м годам большинство микрочипов стали изготавливать по КМОП технологиям.

Если Вы сами когда-нибудь соберётесь разбирать и собирать компьютеры, то имейте в виду, что КМОП микрочипы выходят из строя от статического электричества, поэтому их рекомендуется брать металлическим пинцетом, а не руками.

Правильное руководство фирмой значит очень много. В 1968 году создана фирма *Intel*, которая производит микрочипы. Гордон Мур прислушивался ко всем инициативам сотрудников. Такой подход оправдал себя. В 1969 году только что принятый на работу молодой выпускник Стэнфордского университета Маршиан Эдвард Тед Хофф (*Marcian Edward Ted Hoff*, род. 1937) предложил вместо множества микрочипов, выполняющих разные функции, сделать один программируемый микропроцессор, способный выполнять функции нескольких микрочипов. И уже в 1971 году появ-

ляется первый четырехразрядный микропроцессор *Intel4004* (рис. 110), содержащий 2300 транзисторов, переключающихся с частотой 0,7 МГц.



Рис. 110. Микропроцессор *Intel4004*

Идеи витают в воздухе. *Texas Instruments* в 1972 году также анонсирует выпуск четырехразрядного микропроцессора *TMS1000*. Но *Intel* не стоит на месте. Уже в 1972 году появляется восьмиразрядный микропроцессор *Intel8008* (3500 транзисторов, частота 0,8 МГц), в 1974 году выходит его модернизация *Intel8080* (4200 транзисторов, частота 2 МГц), и в 1978 году новый прорыв – 16-ти разрядный микропроцессор *Intel8086* (29 000 транзисторов, частота до 10 МГц).

Серия *Intel8086* оказалась очень удачной, в 1985 году выходит 32-х разрядный микропроцессор *Intel80386* (275 000 транзисторов), в 1989 начинается выпуск серии 486 (1 200 000 транзисторов), в 1993 году начинается выпуск серии «*Pentium*» ... Таким образом, фирма *Intel* сохраняет лидирующие позиции на рынке микроэлектроники с 1970-х годов до настоящего времени.

В 1965 году руководитель фирмы *Intel* Гордон Мур сформулировал свой знаменитый «закон Мура». Проанализировав рост числа транзисторов на микрочипах, Мур предположил, что число транзисторов будет удваиваться каждые полтора года (18 месяцев). Спустя 10 лет Мур скорректировал прогноз: удвоение транзисторов будет происходить каждые 2 года. Прошло больше сорока лет, а как видно из рис. 111, закон Мура пока выполняется. Строго говоря, нужно говорить не «закон», а «закономерность», поскольку закон Мура никогда не выводился, а является результатом многолетних наблюдений. В 2007 году Мур признал, что его «закон» скоро должен прекратить действовать, поскольку размеры транзисторов скоро приблизятся к атомарным.

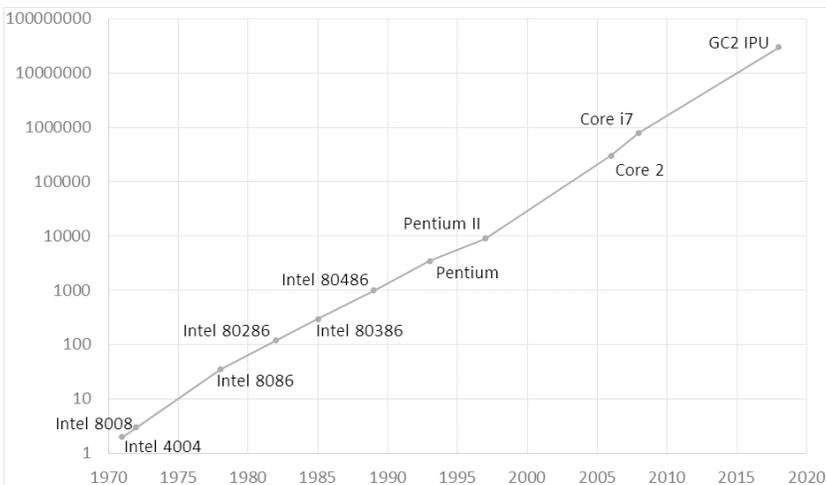


Рис. 111. Закон Мура

Как же удаётся на маленьком кристалле кремния размещать миллиарды транзисторов?

Прежде всего, нужно получить кристалл кремния высокой чистоты. Как мы уже неоднократно видели, многие открытия делались случайно. Способ получения чистого кремния также был открыт случайно, причём задолго до того, как кремний стал использоваться в технике. Еще в 1916



Ян Чохральский  
(1885 – 1953)

году польский химик Ян Чохральский (*Jan Czochralski*, 1885 – 1953), работая с расплавленным оловом, случайно (!) уронил в него свою перьевую ручку. Вытащив перо, он обнаружил, что за ним тянется нить из олова, причём, как оказалось, очень чистого. С тех пор появился метод Чохральского. В расплав металла (олово, свинец, цинк) опускается микроскопический кусок металла (затравка), и на нём начинают образовываться кристаллы этого металла практически без примесей (рис. 112). Метод Чохральского был применён к кремнию (германию), и таким способом удалось получить сверхчистые кристал-

лы кремния.

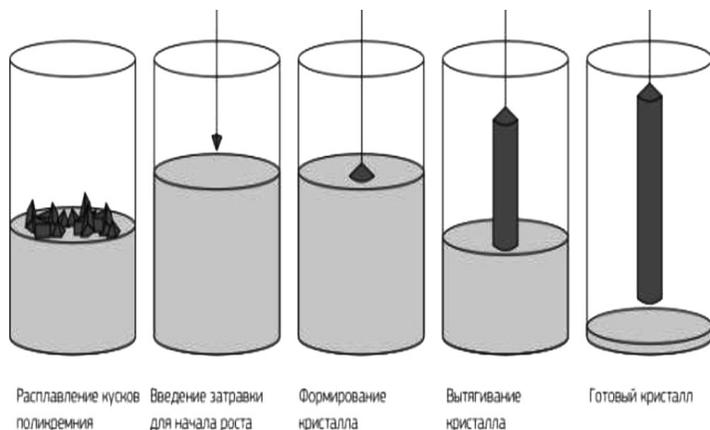


Рис. 112. Метод Чохральского

После того, как получен чистый кристалл кремния, на нём нужно создать  $p$  и  $n$  области.

Процесс создания этих областей похож на производство фотографий до эпохи изобретения цифровой фотопечати (рис. 113). Сначала на поверхность кремния (1) наносится тонкая плёнка (2), которая называется фоторезистом (от греческого слова  $\phi\omega\tau\omicron\varsigma$  (*photos*) – свет и англ. *resistor* – сопротивление). В качестве фоторезиста берётся вещество, меняющее свои физико-химические свойства под действием света. После этого производится освещение (экспонирование) нужных областей фоторезиста (3). Затем берётся вещество, называемое проявителем (4), который смывает не прореагировавший со светом фоторезист. Теперь на свободные от фоторезиста участки кремния нужно нанести примеси. Чтобы получить  $p$ -проводимость наносят трехвалентные элементы (например, алюминий). Для получения  $n$ -проводимости наносят пятивалентные элементы (например, фосфор). Нанести элементы можно разными способами. Наиболее часто это делают электроосаждением (5) или вакуумным напылением. Для вакуумного напыления кристалл кремния помещается в вакуум. С помощью нагрева создаются пары наносимого металла, которые конденсируются на кремнии и образуют очень тонкий слой примеси. Примеси попадают только на те участки, где фоторезист был удален. Затем смывают остатки фоторезиста (6). По окончании всех процедур на кристалл

кремния наносится слой окиси кремния, который будет защищать его от механических повреждений, химического окисления и др. Как видно из приведенного краткого описания, процесс создания микросхемы очень трудоёмкий. Низкая стоимость микросхем возможна за счёт того, что из одного кристалла может получиться тысячи микросхем.

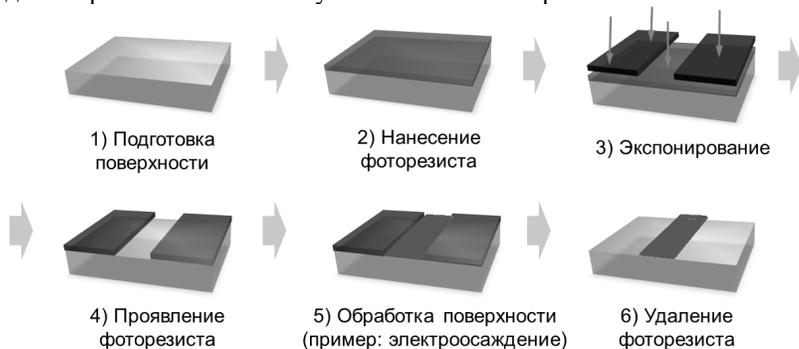


Рис. 113. Производство микросхем

## ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Ключевым процессом создания микросхем является нанесение нужного рисунка на кристалл кремния, который будет определять положение  $p$  и  $n$  областей. Процесс нанесения рисунка на поверхность полупроводника называется литография (от греч. «*lithos*» – камень и «*grapho*» – пишу, пишу, т.е. «письмо по камню»).

Существуют различные виды литографии. В электронной литографии, процесс нанесения рисунка осуществляется электронным лучом, т.е. потоком электронов, движущихся в одном направлении. Но, поскольку печатать можно быстрее, чем писать, то в серийном производстве микросхем используется другой тип литографии, а именно оптическая литография или фотолитография.

Схема фотолитографической установки изображена на рис. 114.

Вначале на прозрачную поверхность наносится рисунок, определяющий положение  $p$  и  $n$  областей будущей микросхемы. Поверхность с рисунком называется маской или фотошаблоном. Размер рисунка намного больше

микросхемы, и он может быть сделан на принтере. В простейшем случае маска является чёрно-белой.

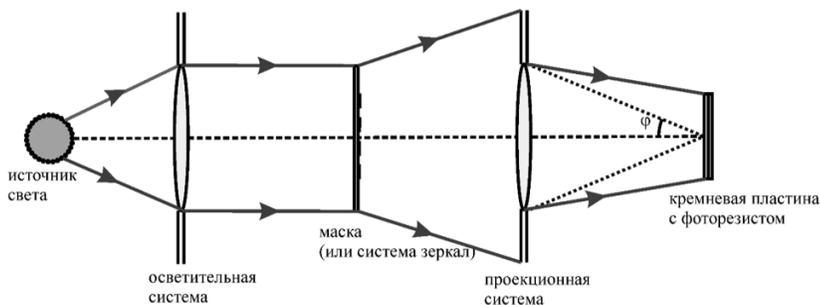


Рис. 114. Схема проекционной фотолитографии

Свет от источника проходит через осветительную систему, обеспечивающую равномерную засветку маски. Изображение маски проецируется с многократным уменьшением на светочувствительный слой фоторезиста.

Насколько же малыми можно сделать элементы микросхем? На сегодняшний день отдельные элементы микросхем имеют размеры порядка десяти нанометров. Как представить себе, насколько мал «**нанометр**»? Слово «нанометр» происходит от греч. *nanos* – карлик, и обозначает одну миллиардную долю метра, т.е. в одном метре содержится один миллиард нанометров (нм). Мы легко можем представить себе тысячную часть метра – миллиметр, а как представить его миллиардную или хотя бы миллионную часть – микрон?

Человеческий волос представляется нам очень тонким, но его толщина составляет в среднем 0,05 мм или 50 микрон. Более мелкие объекты, такие как часто встречающаяся в прудах одноклеточная водоросль хламидомонада, можно рассмотреть при помощи микроскопа. Вирусы, размеры которых могут достигать несколько десятков нанометров, нельзя увидеть в обычном световом микроскопе. Ещё меньшие размеры имеют атомы. Они составляют доли нанометров.

Насколько мал нанометр, можно увидеть на следующем примере. Если было бы можно набирать текст буквами размерами один нанометр, то на одном квадратном миллиметре удалось бы поместить тысячу миллиардов знаков. Этого хватило бы для того, чтобы напечатать «Войну и мир» Льва Николаевича Толстого (1828-1910) более 400 тысяч раз!

Область техники, которая имеет дело с размерами меньше сотни нанометров, относится к нанотехнологиям. Понятие нанотехнологии ввёл уже упоминавшийся лауреат Нобелевской премии Ричард Фейнман (1918 – 1988). В 1959 году он выступил с лекцией на ежегодной встрече Американского физического общества в Калифорнийском технологическом институте. В своём докладе он выразил идею управления и контроля материалов на микроскопическом уровне. Фейнман особенно подчёркивал, что речь идёт не только о миниатюризации, но и о таких возможностях, о которых раньше человечеству приходилось лишь только мечтать, например, о размещении всей Британской энциклопедии на кончике булавки.

Что нам мешает напечатать книгу с размерами букв один нанометр (1 нм)? Конечно, вручную выгравировать буквы с размером 1 нм невозможно. Но можно было бы попробовать поступить следующим образом. Взять текст обычного размера, и затем спроецировать его с большим уменьшением на фотобумагу или фотоплёнку. Собственно, так и делали шпионы в классических фильмах, чтобы получить микроплёнку. Казалось бы, такой способ может дать сколь угодно малый шрифт.

Но здесь нас ждёт разочарование. Так можно делать пока размер шрифта будет больше 1 микрона (1000 нм). Если попытаться дальше уменьшать буквы, мы не сможем получить чёткого изображения букв, даже если взять очень хорошие линзы. Буквы получатся искажёнными. Причина этих искажений лежит в волновой природе света и поэтому полностью неустранима. При таких малых размерах (меньше 1000 нм) не работают законы геометрической оптики и нужно учитывать волновые свойства света – дифракцию, открытую в XVII веке итальянским ученым Франческо Мария Гримальди (*Francesco Maria Grimaldi*, 1618 – 1663).



*Франческо Мария Гримальди (1618 – 1663)*



## СДЕЛАЙ САМ ДИФРАКЦИЯ НА ШТАНГЕНЦИРКУЛЕ

Явление дифракции можно увидеть самим на простом эксперименте. Для этого потребуется лазерная указка и штангенциркуль. Зафиксируем штангенциркуль в штативе и установим на нём маленькую щель в одну десятую миллиметра или меньше. Это можно сделать, зажимая в штангенциркуле небольшую полоску бумаги. В затемнённой комнате посветим лазерной указкой на щель, так чтобы лазерный луч падал на неё перпендикулярно. Если бы свет распространялся строго прямолинейно, мы бы увидели тонкую полоску, ограниченную областью тени. В действительности видно несколько полосок разной интенсивности с нечёткими краями: яркую центральную полоску и слабые боковые. Зажимая в штангенциркуле полоски более тонкой бумаги, можно уменьшить щель до сотых долей миллиметра, и наблюдать увеличение расстояния между центральной и боковыми полосами. Появление боковых полос – это и есть проявление дифракции.

Явление дифракции приведёт к тому, что границы изображения станут нечёткими, а если объекты очень малы, то они и вовсе «размажутся». Это размазывание не позволит получить и букву размером 1 нм, вместо чёткого изображения мы получим размытое пятно. Поэтому явление дифракции ограничивает размеры отдельных элементов микросхем.

Чтобы наглядно представить себе волновую природу света, его можно уподобить волнам на поверхности воды. Расстояние между двумя гребнями волны называют длиной волны  $\lambda$  (рис. 115).

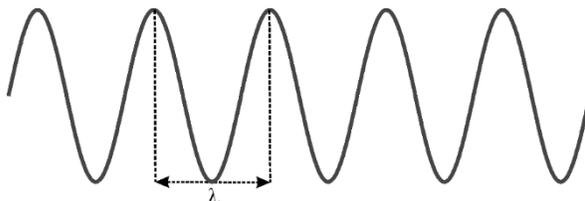


Рис. 115. Длина волны



Джон Уильям Рэлей  
(1842 – 1919)

Каждый цвет и его оттенки, характеризуются своей длиной волны. Например, зелёному цвету соответствует длины волн 500 – 565 нм, красному 625 – 760 нм, синему 440 – 485 нм.

Дифракция ограничивает минимальный размер объекта, который можно получить в проекционной системе. Английский физик Джон Уильям Рэлей (*John William Rayleigh*, 1842 – 1919) определил, что проекционные системы позволяют получать чёткие объекты размером не более *половины длины волны* используемого света. Кроме этого, на размер минимального объекта влияют геометрические размеры проекционной системы, например угол  $\varphi$  на рис. 114.

Чтобы уменьшить размеры изображения нужно уменьшать длину волны источника света. Длины волн фиолетового света лежат на границе видимого диапазона от 450 – 380 нм. Более короткие ультрафиолетовые волны (длины волн от 10 – 380 нм) уже нельзя увидеть человеческим глазом. Но это обстоятельство не мешает использовать источники такого света для получения самых маленьких размеров изображения на сегодняшний день. В фотолитографии активно используют криптон-фторовый лазер (*KrF*) с длиной волны 248 нм, аргон-фторовый лазер (*ArF*) с длиной волны 193 нм и фторовый лазер ( $F_2$ ) с длиной волны 157 нм. Правда для таких источников обычное стекло не подходит, поскольку оно непрозрачно для ультрафиолетового света. Поэтому важнейшей проблемой при разработке современных проекционных фотолитографических объективов является выбор оптических материалов.

Для ультрафиолета на длине волны 193 нм используется плавленный кварц. Более коротковолновые источники света являются непрозрачными и для плавленного кварца. Для них используют фторид кальция (*флюорит*), технология обработки которого более сложна, чем для стекла и плавленного кварца.

Получается, что даже со фторовым лазером можно получать изображе-

ния на фоторезисте не менее 80 нм. Как же фирме *Intel* удастся получать изображения 10 нм и меньше? Они не знают критерия Рэля?

Специалисты фотолитографии давно поняли: если в результате дифракции происходит искажение рисунка, то нужно сделать исходный рисунок «искажённым», так, чтобы в результате дифракции на фоторезисте получился бы нужный рисунок. К сожалению, такая задача не решается в «общем виде» аналитически, и требует расчётов на компьютере численными методами. Методы таких расчётов являются передовым краем современной науки.

В настоящее время ведутся разработки и внедрение альтернативных видов оптической литографии. В одном из них вместо маски используется решётка, составленная из большого количества (например,  $2048 \times 5120$ ) микрозеркал. Зеркала изготавливаются из кремния высокой очистки. Для освещения используется  $ArF$  лазер с длиной волны 193 нм, ширина одного зеркала составляет 8 микрон, проекционная система реализует уменьшение более чем в 250 раз. Поворачивая зеркала, можно управлять лазерным лучом. Отражённый от не отклонённых поворотных зеркал свет преобразуется в освещённые пятна в области изображения, а от отклонённых – в тёмные. При этом размер элемента на фоторезисте получается порядка 30 нм, что далеко выходит за дифракционный предел.

Если говорить о стоимости, то системы зеркал не дороже фотолитографии с масками. Создание маски требует больших затрат, и низкая стоимость микросхем достигается за счёт того, что одну маску используют для создания тысяч микросхем. Применение зеркальных масок позволяет создавать микросхемы индивидуально. Правда при этом рисунок, наносимый на фоторезист, нужно будет рассчитывать для каждой микросхемы отдельно, что при мощности современных компьютеров представляется вполне реальным. Потенциально внедрение зеркальных технологий таит опасность защиты информации, поскольку никто кроме фирмы изготовителя не будет знать «секретных» возможностей каждой микросхемы, например, наличия специальных кодов, с помощью которых можно заставить микросхему передавать информацию втайне от владельца.



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Если у Вас есть информация, которую Вы хотите сохранить в тайне от других, не держите её на компьютере, подключенном к сети. Все сетевые пароли хороши только для защиты от «чайников».

Опыт показывает, что хакеры умеют обходить любые защиты сети и даже вскрывать пароли архиваторов! Храните Вашу «секретную» информацию на съёмных носителях и пользуйтесь ей в отсутствие сети. Всегда оценивайте последствия возможного попадания Вашей «секретной» информации в чужие руки!

Процесс производства микросхем является передовым краем нанотехнологий. Здесь идёт жёсткая конкурентная борьба между ведущими производителями. Это и качество проекционных систем и степени очистки кремния. Но есть сложнейшая проблема, о которой Вы вряд ли задумывались – эта чистота комнат.

Действительно, размеры  $p$  и  $n$  областей на кристалле кремния составляют нанометры, поэтому малейшая невидимая глазу пылинка может оказаться для них огромным валуном (рис. 116). Если такая пылинка попадёт на кристалл кремния при его освещении, то рисунок будет нарушен, не будет создан какой-нибудь важный переход между транзисторами, и микросхема будет работать неправильно.

Для производства микросхем требуется необычная чистота комнат и одежды. «Чистая комната» первого класса должна содержать не более одной пылинки на кубический фут (фут – примерно 30 см). Мы привыкли считать образцом чистоты операционные в больницах. Чистые комнаты в 10000 раз чище операционных. Для таких комнат не годится паркет или линолеум. Пол, стены и потолок должны быть металлическими или из специального пластика (рис. 117). Для достижения и поддержания такой чистоты требуются гигантские системы фильтрации воздуха, которые полностью меняют воздух в чистых комнатах примерно 10 раз в минуту,

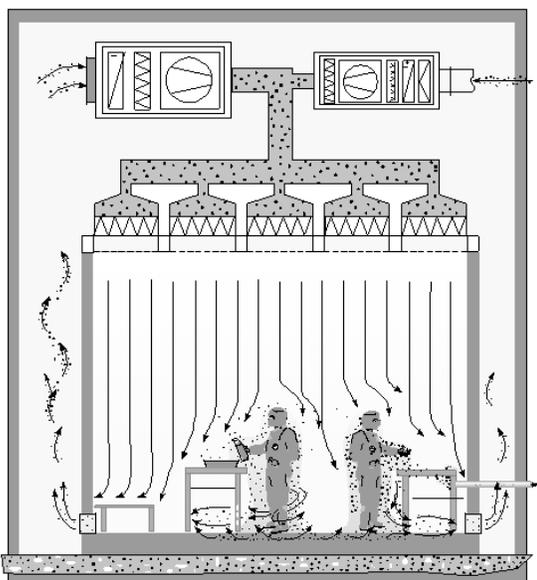


*Рис. 116. Увеличенное изображение невидимой глазом пылинки на фоне микросхемы*

собирая случайно оставшиеся в воздухе частицы (рис. 118). Работники на таких предприятиях должны работать в сверхчистой одежде, причём одевают они её не на входе на завод, а после перехода из одного чистого помещения в другое. Эта одежда имеет специальные системы фильтрации дыхания, чтобы в чистую комнату с выдыхаемым воздухом не попали мельчайшие частицы (рис. 119).



*Рис. 117. Чистое помещение*



*Рис. 118. Схема проветривания чистого помещения*



Рис. 119. Костюм из сверхчистого материала

## ИТОГИ VIII ГЛАВЫ

После изобретения транзисторов началось бурное развитие производства электронной техники на основе транзисторов. Усложнение электронных схем привело к созданию микрочипов, объединяющих сотни, тысячи, а затем и миллионы транзисторов на одном кристалле кремния. На рынке микроэлектроники возникло много успешных фирм, среди которых особенно выделяется фирма *Intel*, сохраняющая лидирующее положение с момента возникновения в 1968 году до наших дней. Один из основателей фирмы *Intel*, Гордон Мур, предсказал, что число транзисторов на микрочипах будет увеличиваться вдвое каждые два года. Это предсказание, в целом выполняется до нашего времени. Размеры элементов на микропроцессорах давно стали меньше 100 нм, т.е. их производство является отраслью нанотехнологий. Используемая при изготовлении микропроцессоров фотолитография является передовым краем современной науки и техники.

Маленький ручеёк исследований электрического тока, начавшийся с экспериментов Гальвани и Вольты, к концу XX века превратился в огромный поток электронной промышленности. Невозможно охватить все направления развития электроники, поэтому сосредоточимся на появлении и победном шествии цифровой техники.

## ГЛАВА 9. ЦИФРОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

*Проследите, чтобы роботы оставались на своих местах пока не проявят киноплёнку.*

*А. Азимов «Я – робот»*

Развитие техники идёт совсем не так, как представляют себе даже самые смелые писатели-фантасты. Один из самых известных американских фантастов Айзек Азимов (*Isaac Asimov*, 1920 – 1992), написавший более 500 книг, представлял, что в будущем человечеству будут помогать «позитронные роботы», люди полетят на Венеру и Марс, создадут «гиператомные» двигатели, научатся прыгать в «гиперпространство», доберутся до далёких звезд. Каких только чудес техники нет у Азимова! Но у его героев в далёком космосе нет видеомагнитофонов. Не только современных цифровых, но даже видеомагнитофонов на магнитной плёнке, которые появились в США уже в 1953 году, буквально через несколько лет после выхода сборника «Я – робот». Разумеется, у героев фантастических романов 1950-х – 1960-х годов нет ни планшетов, ни смартфонов, ни просто сотовых телефонов.

Сегодня мы не можем представить себе мир без компьютеров. Люди старшего поколения ещё помнят, как в 1990-ые в наш мир стремительно ворвались сначала запредельно дорогие, а затем всё более дешевеющие и всё более доступные персональные компьютеры. Как сложно было на склоне лет преодолевать психологический барьер «компьютеробоязни», привыкать к экранам, по которым бежали надписи, за которыми невозможно было уследить, к клавиатуре, на которой невозможно было отыскать нужную букву... К счастью, современные дети не боятся компьютеров. Изготовители компьютеров создали много (даже слишком много!) увлекательных компьютерных игр, так что современные дети осваивают компьютер раньше, чем начинают говорить. Как же всё это начиналось?

Как и многие изобретения электронной эпохи, компьютеры появились раньше открытия электрического тока. Потребность в счёте была всегда и для облегчения расчётов в прошлые столетия было изобретено немало механизмов. Простейшим из них были счёты (рис. 120), которые появились в глубокой древности и использовались продавцами магазинов и кассирами до конца XX века.

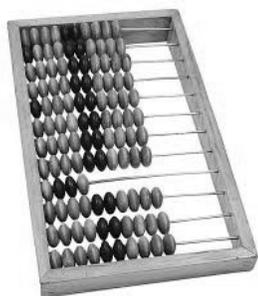


Рис. 120. Счёты

Археологи обнаружили недалеко от греческого острова Антикитера механизм, относящийся примерно ко II веку до н.э. содержащий 30 бронзовых колёс в деревянном корпусе, который использовался для расчёта движений планет (рис. 121). Немецкий астроном и математик Вильгельм Шиккард (*Wilhelm Schickard*, 1592 – 1635) в 1623 году создал арифмометр – устройство с помощью которого можно было выполнять 4 арифметических действия. Над созданием счётных механических машин работали французский физик Блез Паскаль (*Blaise*

*Pascal*, 1623 – 1662), немецкий физик и математик Готфрид Вильгельм Лейбниц (*Gottfried Wilhelm Leibniz*, 1646 – 1717), российский математик Пафнутий Львович Чебышёв (1821 – 1894) и др.



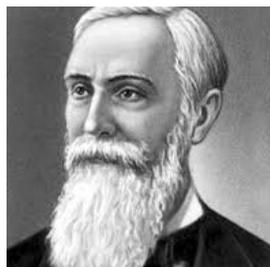
Вильгельм Шиккард  
(1592 – 1635)



Блез Паскаль  
(1623 – 1662)



Готфрид Вильгельм  
Лейбниц  
(1646 – 1717)



Пафнутий Львович  
Чебышёв (1821 – 1894)



*Рис. 121. Антикитерский механизм, слева – вид поднятых со дна частей, справа - реконструкция*

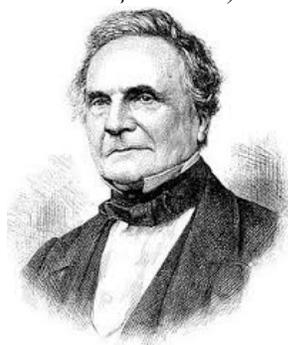
Счётные машины имели оригинальное строение, но у всех был недостаток – они создавались в одном или небольшом числе экземпляров. Серийное производство арифмометров началось только в конце XIX века (рис. 122) и продолжалось до появления электронных калькуляторов. Большой проблемой арифмометров было наличие большого числа мелких механических деталей, что приводило к частым поломкам.

Перфоленты – неизменный атрибут компьютеров второй половины XX века, также появились задолго до эры электроники. Ещё в 1804 году французский механик Жозеф Мари Жаккар (*Joseph Marie Jacquard*, 1752 – 1834) стал использовать бумагу с вырезанными отверстиями для «программирования» ткацких станков. Бумага медленно прокручивалась специальным механизмом, и, в зависимости от положения отверстий, приводились в движение крючки и иглы с нитями, что позволяло создавать затейливые узоры (рис. 123).

Весьма амбициозным был проект механической счётной машины английского инженера Чарльза Бэббиджа (*Charles Babbage*, 1791 – 1871). Вначале он создал малую разностную машину (1819 – 1822), которая оперировала с 18-ью разрядными числами. В 1823 году



*Рис. 122. Арифмометр В.Т. Однера (Петербург, конец XIX века)*



*Чарльз Бэббидж (1791 – 1871)*

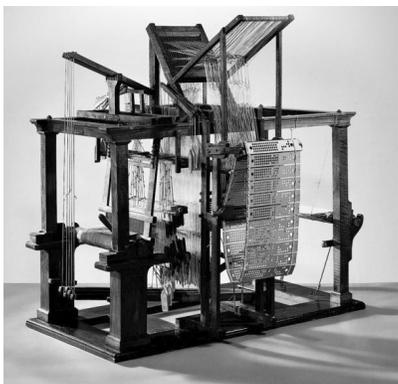


Рис. 123. Ткацкий станок с перфолентой, XVIII век



Рис. 124. Разностная машина Бэббиджа (фрагмент)

он начал создавать большую разностную машину, которая должна была состоять из 25 000 (!) деталей, весить 14 тонн, иметь память на тысячу 50-разрядных чисел и печатающее устройство для вывода результатов (рис. 124). Машина создавалась 11 лет (с 1823 по 1834), на неё было затрачено 17000 фунтов государственных денег и около 6000 фунтов самого Бэббиджа, правительство отказалось далее финансировать проект, и машина так и не была достроена.

Несмотря на неудачу, Бэббидж в 1834 году начал разрабатывать проект программируемой механической вычислительной машины. По его замыслу машина должна была содержать «склад» для хранения переменных, «мельницу» для проведения арифметических операций, управляющий элемент для чтения перфокарт и устройства ввода-вывода информации. В этой машине мы видим все составляющие современного компьютера:

память, арифметический процессор, устройство чтения программного кода и ввод-вывод. Помощницей Бэббиджа стала графиня Ада Лавлейс (*Ada Lovelace*, 1815 – 1852), дочь поэта Джорджа Гордона Байрона. Она создала программу для разрабатываемой машины и стала, таким образом, первым в мире программистом. Проект Чарлза Бэббиджа оказалась работоспособным, правда, машину построил уже его сын Генри по чертежам отца в 1906 году.

Чарлз Бэббидж не был неудачником. За свои 80 лет он успел удивительно много. Он сконструировал строгальный и токарный станки, придумал новые методы изготовления зубчатых колёс, методы заточки инструментов и литья, изобрёл спидометр, офтальмоскоп, сейсмограф. Он занимался

безопасностью железнодорожного движения, вопросами шифрования, оптикой, геологией... И, хотя главных труд своей жизни – аналитическую машину он не довёл до конца, первый американский программируемый компьютер «Марк I», созданный в 1941 году под руководством Говарда Эйкена (*Howard Aiken*, 1900 – 1973), имел архитектуру во многом схожую с аналитической машиной Чарлза Бэббиджа.

Появление электричества открыло новые возможности перед изобретателями счётных машин. Можно было отказаться от зубчатых колёс, заменив их электрическими реле. Но для этого нужно было использовать не десятичную, а двоичную систему счисления.

Если Вы уже знаете, что такое двоичная система счисления, можете пропустить следующий абзац.

В десятичной системе счисления цифры означают, сколько в числе содержится единиц, десятков, сотен и др. степеней числа 10. Например:

$$123 = 1 \cdot 100 + 2 \cdot 10 + 3.$$

Число 123 содержит три единицы, два десятка и одну сотню.

В двоичной системе счисления числа состоят из 0 и 1, которые показывают сколько число содержит единиц, двоек, четвёрок и др. степеней числа 2. Например:

$$123 = 1 \cdot 64 + 1 \cdot 32 + 1 \cdot 16 + 1 \cdot 8 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 1.$$

В двоичной системе число 123 будет иметь вид: 1111011.

Чем удобна двоичная система? Чтобы держать в памяти компьютера десятичное число, нужна шестерёнка, которая может принимать 10 позиций – от 0 до 9. Двоичное число можно запомнить с помощью электрического реле: 1 – ток идёт, 0 – ток не идёт. В этом случае говорят, что одно реле запоминает 1 *бит* информации. Значит, чтобы запомнить число 123 нужно либо 3 шестерёнки, либо 7 реле. Выстроив в ряд 8 реле, мы можем запомнить любое число от 0 до 255, иначе говоря, мы можем запомнить 8 бит или 1 *байт* информации. Нам никто не мешает выстроить в ряд 16, 32 и больше реле.



*Ада Лавлейс*  
(1815 – 1852)

Чтобы сложить два десятичных числа нужно вращать шестерёнки, а это долго. С двоичными числами проще производить арифметические операции. Не вдаваясь в технические детали, рассмотрим задачу в общем виде. Пусть у нас числа записываются, например, рядами из 8 реле. Назовём эти ряды *регистрами*. Нам нужно сложить числа в регистрах *A* и *B* и записать результат в регистр *C*, как показано на рис. 125.

Складывать нужно значения в одинаковых разрядах, например, сложим значения в 1-ых разрядах. Нам нужно так сконструировать суммирующие реле, чтобы они обрабатывали три ситуации. Если в первых разрядах регистров *A* и *B* нули, т.е. ток через первые реле в обоих регистрах не идёт, то результат сложения должен быть 0, т.е. в регистре *C* ток через первое реле также не идёт. Если в одном из регистров 1, а в другом 0, то в регистр *C* запишется 1, т.е. реле включается. Самый сложный случай, если нужно сложить две единицы: тогда в этот разряд регистра *C* будет записан 0, но в более старший (более левый) разряд нужно записать 1. Если там уже записан 1, то он должен стать 0, а 1 должна перейти в более старший разряд (рис. 125, справа).

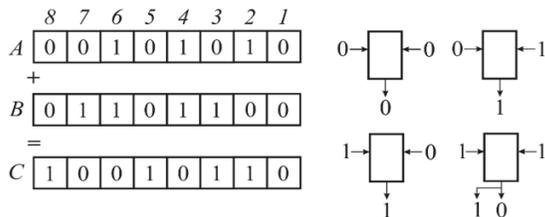


Рис. 125. Принципиальная схема сложения двоичных чисел

По такому алгоритму нужно сложить все разряды. Осталось предусмотреть ситуацию, когда последнюю единичку куда будет перенести. Тогда должна пройти команда переполнения регистра *C*.

Возникает вопрос: с какой скоростью может работать такая машина? Очевидно, что скорость работы машины ограничена скоростью переключения реле. Реле может переключаться несколько раз в секунду. Следовательно, машина может проводить несколько операций в секунду, что намного быстрее вращения шестерёнок.

Первый компьютер «*Model K*», использующий реле и двоичный код, был построен в 1937 году Джорджем Стибцом (*George Stibitz*, 1904 – 1995)

из уже знакомой нам компании *Bell Labs*. Практически одновременно, в 1938 году, релейный компьютер Z1 сделал в Германии инженер Конрад Цузе (*Konrad Zuse*, 1910 – 1995).

Сегодня мы под компьютером понимаем планшет, который умещается в кармане или на столе, но в то время компьютеры были громоздкими сооружениями. Например, сделанный по заказу ВМФ США в 1944 году компьютер Марк I, содержал более 700 тысяч деталей, занимал площадь в несколько десятков квадратных метров, весил 4,5 тонны, а общая длина соединительных проводов составляла 800 км. Скорость его вычислений тоже впечатляла: он складывал числа за треть секунды, а умножал за 6 секунд. Сложно представить, что 70 лет назад это считалось передовым краем вычислительной техники (рис. 126).

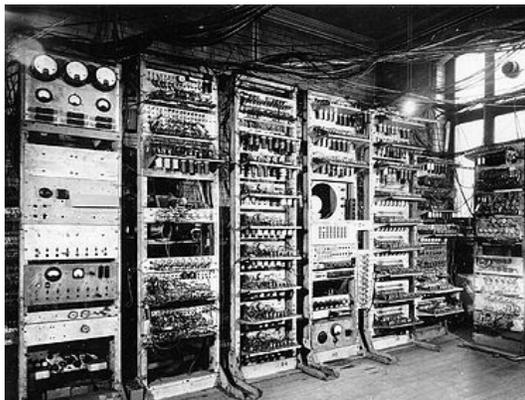


Рис.126. Компьютер Марк I (1944)

Надёжность компьютера тоже оставляла желать лучшего. В один прекрасный день компьютер аварийно прекратил работу. После нескольких часов поисков обслуживающие программисты обнаружили, что в одно реле залетел мотылёк (или жучок) – *bug* («баг»). С тех пор обнаружение неисправностей в компьютерах называют *debug* («дебаг») – «обезжучиванием».

Релейные компьютеры уступили место ламповым. Созданные в начале XX века электронные радиолампы тоже могут использоваться для записи двоичных чисел: ток идёт через лампу – 1, не идёт – 0. При этом они могут переключаться в сотни раз быстрее реле. Но для компьютеров требо-

валось соединить тысячи радиоламп. Учитывая, что радиолампы перегорают, у компьютеров их нужно было постоянно менять, и было сомнение, что компьютер на радиолампах сможет долго проработать. Тем не менее в 1945 году был собран компьютер на радиолампах *ENIAC* (*Electronic Numerical Integrator and Computer*). Компьютер содержал более 17 тысяч радиоламп, весил более 30 тонн (рис. 127). При этом он мог производить в секунду 5000 операций сложения или 350 операций умножения, т.е. в 1000 раз быстрее компьютера Марк I. Благодаря тщательному отбору радиоламп, компьютер работал до 20 часов между их перегоранием. Но при этом он потреблял 170 кВт, т.е. как 85 одновременно работающих электрочайников. Поэтому после появления транзисторов возникло второе поколение компьютеров – на транзисторных переключателях – триггерах. Транзисторы не уступали радиолампам по быстродействию, но занимали гораздо меньше места и потребляли намного меньше энергии.

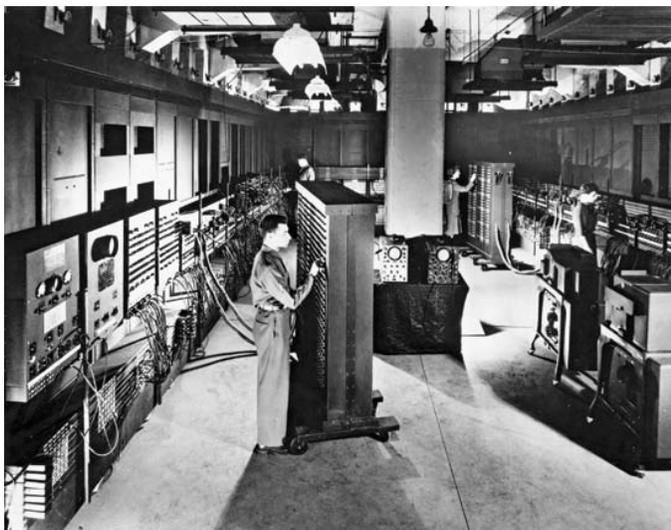


Рис. 127. Компьютер *ENIAC* (1945)

Один из первых компьютеров на транзисторах был выпущен в США фирмой *IBM* (*International Business Machines*) в 1959 году (*IBM1401*). Он уже имел размер с письменный стол, использовал перфоленты и магнитную память. С 1960 по 1964 год было выпущено более 100 тыс. экземпляров таких компьютеров (рис. 128).

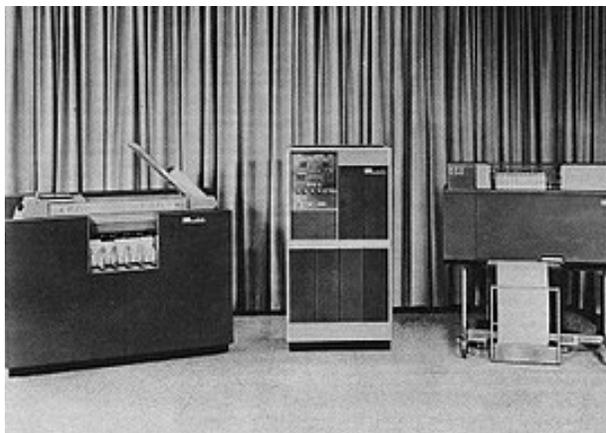


Рис. 128. Компьютер IBM1401 (1959)

Появление микросхем привело к созданию компьютеров третьего поколения, а изобретение в 1971 году микропроцессоров дало начало компьютерам четвёртого поколения. Если раньше компьютеры стояли в военных, научных, промышленных центрах, то в 1970-х годах они становятся *персональными*.

В 1975 году компания *MITS (Micro Instrumentation and Telemetry Systems)* выпускает первый массовый персональный компьютер *Altair* конструкции Генри Эдварда Робертса (*Henry Edward Roberts, 1941 – 2010*) на основе микропроцессора *Intel 8080*. Его даже трудно назвать компьютером, скорее, это – программируемый калькулятор. Он не имел привычной сейчас клавиатуры, но его стоимость составляла всего \$621, что делало его общедоступным. Компьютер *Altair* пользовался успехом, и за первый год было продано несколько тысяч



Генри Эдвард Робертс  
(1941 – 2010)



Рис. 129. Первый персональный компьютер IBM PC (1981)



Алан Мэтисон Тьюринг  
(1912 – 1954)

компьютеров.

Успех *Altair* побудил выйти на рынок персональных компьютеров другие фирмы, в том числе *Apple Computer*, *Texas Instruments* и др. В 1981 году на основе микропроцессора 8086 фирма *IBM* начала выпуск персональных компьютеров *IBM PC (5150)*, стоимостью в зависимости от конфигурации от \$1500 до \$3000. Операционную систему для нового компьютера *MS-DOS* создала тогда маленькая малоизвестная компания *Microsoft*. Они уже имели привычную для нас конфигурацию с клавиатурой и дисплеем и, конечно же, с компьютерными играми (рис. 129).

Компьютерные игры появились раньше персональных компьютеров и даже раньше дисплеев. Ещё в 1948 году английские математики Алан Мэтисон Тьюринг (*Alan Mathison Turing*, 1912 – 1954) и Дэвид Чампернаун (*David Champernowne*, 1912 – 2000) разработали алгоритм шахматной игры. К сожалению, тогда ещё не было компьютеров, чтобы этот алгоритм реализовать.

## ЦАП И АЦП

По мере улучшения дисплеев, звуковых карт, быстродействия процессоров игры становились всё более красочными, всё более захватывающими. Однако цифровая революция - это не только появление компьютеров с программами, базами данных, играми, интернетом... Цифровыми стали фото и видео камеры, диктофоны, плееры, телефоны. Теперь фото и видео можно загружать в компьютер, обрабатывать, пересылать по интернету. Всё это стало возможно благодаря аналого-цифровым преобразователям (АЦП), преобразующим обычные электрические напряжения в наборы чисел, и обратным цифро-аналоговым преобразователям (ЦАП), преобразующим цифры в обычные электрические сигналы, которые можно, например, подать на динамик и получить звуковую мелодию.

В простейшем случае ЦАП представляет стабильный источник тока и конденсатор. Источник тока включается на время, пропорциональное введённому числу. Недостатком таких ЦАП является сложность создания стабильного источника постоянного тока. Позже ЦАП стали делать на другом принципе: генератор заряжает конденсатор цепочкой импульсов, причём частота импульсов пропорциональна введённому числу. Существуют и другие конструкции ЦАП.

Недостатком ЦАП является то, что он изменяет сигнал не плавно, а ступеньками (скачками), по мере того, как на него приходят команды с новыми значениями напряжений. На рис. 130 показан плавно меняющийся сигнал (пунктирная линия) и выработанный сигнал ЦАП по результатам оцифровки. Видно, что сигнал меняется не плавно, а скачками. Чем чаще ЦАП меняет значения напряжения, тем менее заметны ступеньки.

Рассмотрим, как в принципе может работать АЦП. Главной характеристикой АЦП является разрядность – т.е. какое максимальное число может на выходе давать АЦП. Предположим, что у нас есть 3-х разрядное АЦП, т.е. АЦП способно давать на выходе двоичные числа от 0 до 111 (111 в двоичной системе равно 7). Пусть на вход АЦП можно подавать сигналы от 0 до максимального значения  $U_0$ .

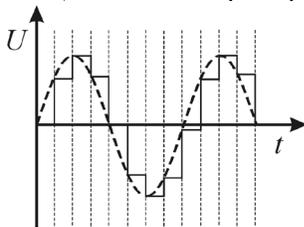


Рис. 130. Скачкообразное изменение сигнала на выходе ЦАП

Важнейшей частью АЦП является компаратор, т.е. устройство, умеющее сравнивать уровень двух сигналов. Поскольку сейчас обычно используют МОП технологии, то будем считать входное сопротивление АЦП практически бесконечным. Другим важным компонентом АЦП является генератор опорного напряжения, вырабатывающий нужное напряжение. Преобразование проведём в несколько этапов (рис. 131).

1) Генератор выставляет половину максимального напряжения  $U_0/2$ , а компаратор сравнивает входное напряжение  $U_x$  и  $U_0/2$ . Предположим, что  $U_x > U_0/2$ . Выставляем старший (крайний левый) бит 1.

2) Генератор выставляет напряжение  $U_0 \cdot 3/4$ , предположим, что  $U_x < U_0 \cdot 3/4$ . Выставляем второй бит 0.

3) Генератор выставляет среднее напряжение между предыдущими зна-

чениями  $U_0 \cdot 3/4$  и  $U_0/2$ , т.е.  $U_0 \cdot 5/8$ . Предположим, что  $U_x > U_0 \cdot 5/8$ . Выстав-  
 ляем третий бит 1.

Таким образом, величина неизвестного напряжения находится в интерва-  
 ле  $U_0 \cdot 5/8 < U_x < U_0 \cdot 3/4$ . АЦП выдаёт двоичное значение напряжения 101  
 или десятичное значение 5. Таким образом, АЦП покажет, что неизвест-  
 ное напряжение  $U_x = U_0 \cdot 5/8$ .

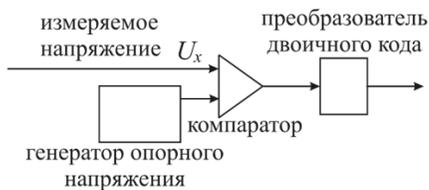


Рис. 131. Принцип работы последовательного АЦП

Заметим, что этот алгоритм сравнения не является изобретением XX



Леонардо Фибоначчи  
 (1170 – 1250)

века. Его придумал средневековый математик из  
 Итальянского города Пиза Леонардо Фибонач-  
 чи (*Leonardo Fibonacci*, 1170 – 1250). Он решал  
 задачу: требуется найти минимальный комплект  
 гирь, чтобы взвесить на равноплечных весах  
 любой груз от 1 до 7 грамм, при этом гири мож-  
 но класть только на одну чашу весов. Очевид-  
 ный ответ: нужны три гири – 1, 2, 4 (грамм), а  
 порядок взвешивания описан выше.

Приведённый пример показывает:

1) Точность 3-х разрядного АЦП составляет  $U_0/8$ , чем больше разрядов у АЦП, тем точнее он измеряет напряжение. Сейчас обычно используют 10, 12 и 16-ти разрядные АЦП. Их точность составляет  $U_0/1024$ ,  $U_0/4096$  и  $U_0/65\ 536$ , соответственно. Этого вполне достаточно для практических задач. Существуют и 24 разрядные АЦП с точностью оцифровки  $U_0/16\ 777\ 216$ .

2) Чем больше разрядов, тем больше нужно сделать шагов по указанному алгоритму, тем медленнее будет работать АЦП.

Сказанное относится к так называемым последовательным АЦП, содержащим один компаратор. Можно сделать параллельное АЦП. Пусть в на-

шем примере АЦП содержит 8 компараторов, стабилизированный источник питания выставляет 8 значений напряжений:  $U_0 \cdot 1/8$ ,  $U_0 \cdot 2/8$ ,  $U_0 \cdot 3/8$ ,  $U_0 \cdot 4/8$ ,  $U_0 \cdot 5/8$ ,  $U_0 \cdot 6/8$ ,  $U_0 \cdot 7/8$ ,  $U_0$  (рис. 132).

Теперь подадим входной сигнал сразу на 8 компараторов и сравним его с указанными значениями напряжений (рис. 132). Мы измерим входную величину за один шаг! Правда, это сильно усложнит схему АЦП и увеличит его стоимость. На практике в АЦП комбинируют оба этих подхода. Существуют и более сложные схемы АЦП, но мы их рассматривать не будем.

Сначала АЦП выпускались на радиолампах, но такие конструкции были очень громоздки. Широкое использование АЦП началось с появлением микросхем. В 1964 году уже знакомая нам фирма *Fairchild* выпустила первые интегральные микросхемы АЦП. Разработал их инженер Роберт Джон Видлар (*Robert John Widlar*, 1937 – 1991).

Самое очевидное применение АЦП – это запись звука. Звук подаётся на микрофон – с микрофона синусоидальный электрический сигнал поступает на АЦП и превращается в последовательность цифр. Обратным преобразованием можно превратить цифры в электрические сигналы и подать их на динамик (рис. 133). Возникает вопрос: не будет ли при этом теряться качество звука? Еще задолго до появления персональных компьютеров этим вопросом занялся советский радиофизик Владимир Александрович Котельников (1908 – 2005). В 1933 году он доказал, так называемую теорему Котельникова, что аналоговый сигнал может быть точно восстановлен, если оцифровка проводи-

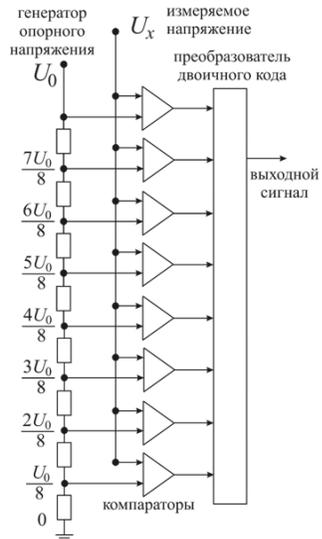


Рис. 132. Работа параллельного АЦП



Роберт Джон Видлар  
(1937 – 1991)



Владимир Александрович Котельников  
(1908 – 2005)

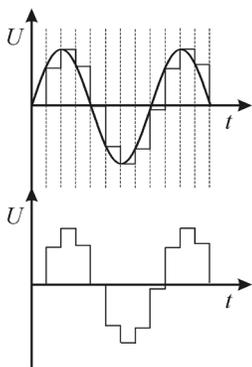


Рис. 133. Оцифровка и восстановление звукового сигнала

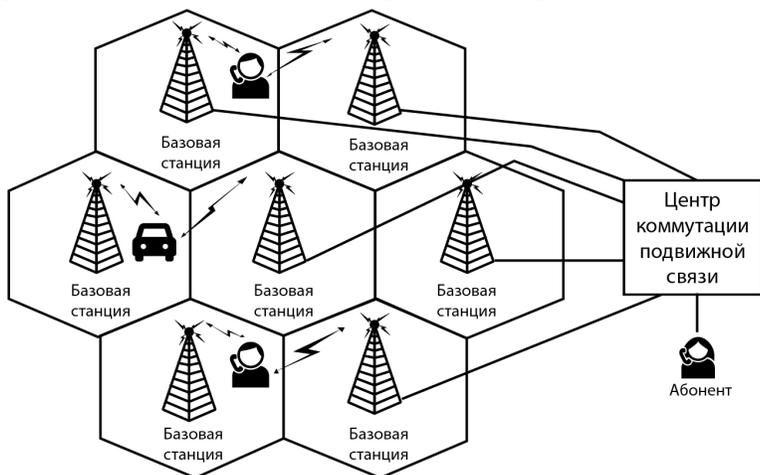
лась с частотой, равной максимальной частоте сигнала, умноженной на два. К сожалению, русскоязычные публикации часто остаются неизвестными на Западе, и эту теорему ещё раз доказал в 1949 году американский математик Клод Шеннон (*Claude Shannon*, 1916 – 2001). Поэтому на Западе эту теорему часто называют теоремой Шеннона или теорема Найквиста – Шеннона.

Человеческое ухо слышит звуки частотой до 20 кГц (20 тысяч колебаний в секунду), поэтому для воспроизведения *любого* звука нужен АЦП с частотой оцифровки 40 кГц. Однако на практике без существенной потери качества можно ограничиться полосой до 8 кГц, а для записи голоса – до 3 кГц. Чем чаще АЦП оцифрует звук и чем точнее он это делает, тем больше по размеру получается файл. Иметь дело с большими файлами неудобно, поэтому звуковые файлы «сжимают», т.е. проводят математические операции, уменьшая объём файлов без заметного ухудшения качества звучания. Обработка файлов является математической процедурой, и её разбор выходит за рамки данной книги. Сейчас очень популярен стандарт сжатия *mp3*. Стандарт *mp3* был разработан в Германии в 1991 году, с 2017 года он находится в свободном доступе (истёк срок действия патентов).

## СОТОВАЯ СВЯЗЬ

Возможность оцифровывать звук привела к возникновению сотовых телефонов. Казалось бы, организовать сотовую связь не так уж и сложно: нужно поставить станции приёма-передачи в прямой видимости друг от друга, как показано на рис. 134. Вышки должны «покрывать» местность подобно сотам, отсюда и возникло название «сотовая связь». Чем выше

расположены передатчики, тем дальше их будут видеть другие станции. Чем-то это напоминает старый оптический телеграф – там тоже сигнальные шесты располагались на высоких башенках в 10 км друг от друга. Расстояние между мачтами (столбами) сотовой связи так же располагают в среднем на расстоянии 10 км, но расстояния могут быть больше или меньше в зависимости от рельефа местности. В городах, где железобетонные здания экранируют радиоволны, вышки нужно ставить чаще. Сотовую связь можно сделать даже под землёй, в метро. Конечно, радиоволны через толщу земли и железобетона не пройдут. Но можно сделать приёмные станции на станциях метро, а от них проложить кабели наверх и соединить с наземной мачтой. Мачты могут иметь связь не только друг с другом, их можно подключить к городской телефонной цепи.



*Рис. 134. Вышки сотовой связи*

Теперь осталось только взять переносной радиотелефон, соединиться с ближайшей приёмной станцией (будем называть её базовой станцией), она соединится с другими станциями и через одну из них вызовет телефон Вашего собеседника.

Но от идеи до внедрения – огромная дистанция. Возникает два вопроса: сколько абонентов смогут одновременно пользоваться сотовой связью и какого будет качество связи?

Для того, чтобы связью могли пользоваться две пары говорящих абонен-

тов нужно 2 канала связи, три пары – три канала... и т.д. Чтобы говорящие абоненты не мешали друг другу, каналы должны использовать разные частоты. Где же набрать каналов на тысячи и миллионы абонентов?

Первые попытки организовать сотовую связь были предприняты без использования цифровых технологий. В 1973 году в Нью-Йорке компанией *Motorola* была смонтирована первая приёмная станция на вершине одного из небоскрёбов. Она могла обслуживать только 30 абонентов и соединять их со стационарной телефонной сетью. Получалась связь для избранных, стоила она очень дорого, поскольку строительство и обслуживание приёмных станций и аппаратуры должно оплачивать относительно небольшое число абонентов.

В начале 1980-х годов начали появляться стандарты цифровой сотовой связи, которые позволяли обслуживать тысячи абонентов. Наиболее удачным оказался широко используемый стандарт *GSM (Global System for Mobile communications)* – глобальная система для мобильной связи).

Особенностью стандарта *GSM* является разделение частот для приёма и передачи сигналов. В зависимости от используемой частоты передатчиков различают стандарты *GSM-900* и *GSM-1800*.

*GSM-900* использует для передачи от (телефона к станции) частоты в диапазоне 890-915 МГц (миллионов колебаний в секунду) и для приёма 935-960 МГц, *GSM-1800* использует диапазоны 1710-1785 МГц и 1805-1880 МГц, соответственно. Чтобы два соседних канала связи не мешали друг другу между ними должно быть не менее 0,2 МГц. Простая арифметика показывает, что стандарт *GSM-900* поддерживает 125 каналов, а *GSM-1800* – 375 каналов. Это лучше, чем у аналоговой связи 1970-х годов, но как обеспечить тысячи каналов? Это можно сделать благодаря цифровой технологии *TDMA (Time Division Multiple Access)* – множественный доступ с разделением по времени).

Вам кажется, что Вы разговариваете с собеседником непрерывно? На самом деле это не так. Ваша речь автоматически разбивается на временные интервалы примерно 0,5 с. Каждый речевой отрывок быстро оцифровывается АЦП и передаётся на базовую станцию в виде цифрового пакета. При этом время передачи пакета занимает много меньше 0,5 с, так что по одному каналу можно одновременно передавать десятки пакетов, как показано на рис. 135.

Как же станции сотовой связи не путаются кому какой доставить пакет?

Каждый пакет имеет вначале кодировочную запись, в которой указано откуда и куда он направляется и в какой последовательности пакеты нужно сшивать. Телефон абонента принимает пакеты, мгновенно обрабатывает их, посылает полученную информацию на ЦАП, а от ЦАП на динамик. От каждого пакета приходит звуковая дорожка длительностью 0,5 с. Всё происходит настолько быстро, что создаётся иллюзия непрерывного звучания голоса (если пакеты не потерялись по дороге). Правда, Ваш собеседник слышит Вашу речь с запозданием на долю секунды, но обычно этого не замечают. Разумеется, пакеты могут передавать не только звук, но и короткие сообщения – СМС (англ. *SMS* – *Short Message Service* – «служба коротких сообщений»), фотографии, видео и в принципе любые потоки информации, что реализовано в службе мультимедийных сообщений (*MMS*). Вопрос только в том, сколько пакетов потребуется и сколько времени это займёт.

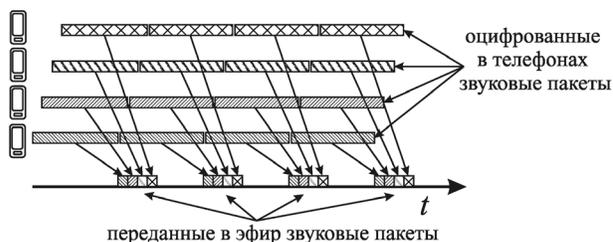


Рис. 135. Схема TDMA

Таким образом, технология *TDMA* позволяет с помощью сотни каналов поддерживать десятки и сотни тысяч телефонных разговоров. Конечно, если миллионы абонентов позвонят одновременно, то сеть их обслужить не сможет. Но обычно все звонят в разное время и говорят меньше 24 часов в сутки. Разве, что в новогоднюю ночь после боя курантов все бросаются поздравлять друзей, и такую пиковую нагрузку сеть не выдерживает.

Можно только удивляться быстродействию современных телефонов, успевающих оцифровывать нашу речь, пересылать её, одновременно принимать и декодировать речь собеседника. Также можно удивляться быстродействию станций сотовой связи, передающих в нужном направлении большое число информационных пакетов.

Говоря о цифровой передаче информации нельзя не сказать о грандиозном улучшении качества связи. На обычную аналоговую связь (разобранную

выше амплитудную модуляцию) большое влияние оказывают шумы. Речь идёт не о тех шумах, которые доносятся с улицы или из соседней квартиры, речь идёт об источниках радиоволн самых разных частот. Большие шумы во всём диапазоне радиочастот создают обычные искры, вспомним, что первый радиоприёмник Попова называли «грозоотметчик», поскольку он улавливал разряды молний. Искры, хотя бы небольшие, создают практически все работающие электродвигатели, поскольку у них есть скользящий контакт между неподвижными щётками (обычно из графита) и вращающимся ротором. В каждой квартире есть пылесосы, стиральные машины, холодильники, фены, электробритвы, во многих помещениях есть кондиционеры, в подвалах и на чердаках стоят вентиляторы, насосы подачи воды... и т. д., вокруг постоянно используют электродрели и другой электроинструмент, по улицам ездят троллейбусы и трамваи, в черте города ходят электрички... В общем, источников искр хватает. Источниками электромагнитного излучения являются сотовая связь, телевизоры, компьютеры и др. Учитывая обилие источников излучения, были введены стандарты, ограничивающие электромагнитное излучение бытовой техники. Электромагнитные волны излучают также газоразрядные (энергосберегающие) лампы, в том числе уличного освещения. Правда, в последнее время они уступают место светодиодным лампам.

Таким образом, вокруг нас огромное количество источников электромагнитных волн. Те, кто пользуются транзисторными радиоприёмниками в АМ (амплитудная модуляция) диапазоне хорошо это знают. Шумы маленькие и большие (наводки) накладываются на принимаемый полезный сигнал, искажая его, как показано на рис. 136, слева. В 1940-ые для радиовещания стал использоваться другой тип модуляции. Её называли частотной модуляцией (ЧМ). На маленьких транзисторных приёмниках часто можно увидеть английское сокращение частотной модуляции *FM* (*frequency modulation*). Для частотной модуляции небольшие шумы не страшны. Мы не будем углубляться в принципы её работы, поскольку частотная модуляция уступает место цифровой связи. При передаче цифр наличие шума вообще не имеет значения, пока уровень шума позволяет точно различить 0 и 1 в принимаемом сигнале, рис. 136, справа. Проблемы возникают, когда уровень шума достигает уровня полезного сигнала.

Таким образом, применение цифровой связи позволило, как увеличить число одновременно обслуживаемых абонентов, так и значительно улучшить качество сотовой связи.

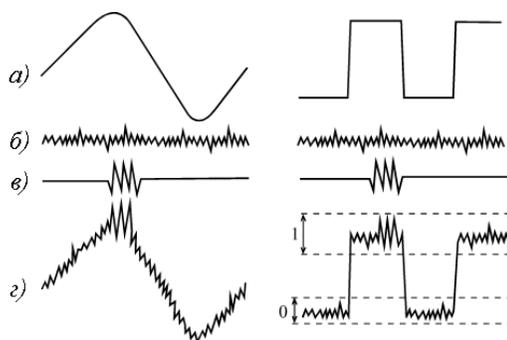


Рис. 136. Наложение шумов на сигналы: аналоговый – слева и цифровой – справа. а) исходный сигнал, б) постоянный шум в эфире, в) сильные отдельные наводки при вкл. моторов и др., г) принимаемый сигнал.

Рассказ о сотовой связи был бы неполным без упоминания о возможности использовать сотовые телефоны (смартфоны и др.) для работы в интернете. Для этого был разработан протокол *GPRS* (*General Packet Radio Service* – пакетная радиосвязь общего пользования). При запросе данных из интернета для абонента открывается отдельный канал, так, чтобы абонент мог одновременно говорить по телефону и получать данные из интернета. Но этот канал можно открыть только при наличии свободных каналов. Поскольку голосовая связь имеет приоритет (во всяком случае у российских операторов), то доступ к каналу может быть получен, только если сеть не перегружена. Более того, если сеть свободна, то для ускорения получения данных из интернета базовая станция может выделить несколько голосовых каналов. При этом операторы обычно берут плату не за время получения данных, а за их объём.

Обмениваться информацией с помощью радиоволн могут не только телефоны, но и смартфоны, планшеты, ноутбуки, цифровые фотоаппараты, принтеры, мыши, клавиатуры и др. Для этого были разработаны многочисленные протоколы, наиболее популярными сегодня являются *Bluetooth* и *Wi-Fi*.

Стандарт *Bluetooth* (англ. *blue* – синий и *tooth* – зуб) обязан своим названием королю викингов Харальду Синезубому (*Harald Blatand*, X век). Он был принят в 1998 году, как замена интерфейсному кабелю. Поэтому *Bluetooth* прост в подключении, и действует на расстоянии несколько метров (в за-



Король викингов Харальд Синезубый (X век)

висимости от мощности передатчика).

Примерно в то же время появился протокол *Wi-Fi*, как результат договорённости группы компаний сотовой связи. Разработчики не расшифровали название. Считается, что термин *Wi-Fi* придуман для привлечения внимания потребителя как игра слов от термина *Hi-Fi* (*High Fidelity* – высокая точность). *Bluetooth* и *Wi-Fi* работают на сверхвысоких частотах порядка 2,4 гигагерц.

Протокол *Wi-Fi*, предусматривает возможность обмена информацией не только между самими устройствами, но и допускает общую точку доступа, с помощью которой можно выходить в интернет, как показано на

рис. 137.

Обсуждая возможности протоколов *Bluetooth* и *Wi-Fi*, нужно иметь в виду, что они постоянно совершенствуются. Большинство современных мобильных устройств поддерживают оба эти протокола.

Когда Вы передаёте информацию по радиоканалу, помните, что сигнал может быть перехвачен. Существуют системы шифрования данных, однако существуют и хакеры, умеющие эти шифры вскрывать.



Рис. 137. Организация связи устройств *Wi-Fi*

## ЦИФРОВЫЕ ФОТО-(ВИДЕО) КАМЕРЫ

Цифровая революция коснулась не только радио и звука, но и изображения. Фотография известна давно. Первую фотографию ещё в 1826 году сделал французский изобретатель Жозеф Нисефор Ньепс (*Joseph Nicéphore Niépce*, 1765 – 1833). Но тогда фотография, а позже и кинофильмы требовали проведения длительных химических процессов проявления и закрепления. Так что фотографы (кинооператоры) не могли сразу увидеть результаты своей работы. В эпиграфе к данной главе, взятом из книги «Я – робот», роботы должны были длительное время неподвижно стоять и ждать, пока проявят плёнку.

По мере развития электроники фотохимическим процессам на смену пришли светочувствительные матрицы: сначала так называемые ПЗС – матрицы (прибор с зарядовой связью), затем их сменили уже знакомые нам КМОП – технологии. Разберём устройство КМОП – матриц.

Основу элемента КМОП – матрицы представляет светодиод. Свет падает на него через линзу и светофильтр, как показано на рис. 138. Линза не является обязательным элементом. Просто между светодиодами находятся управляющие элементы и в отсутствие линз часть света не попадала бы на светодиоды. Это ухудшило бы светочувствительность.

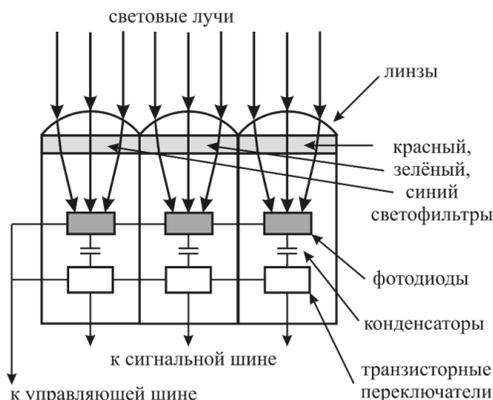
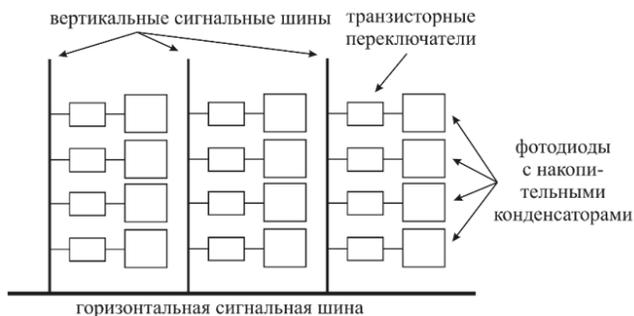


Рис. 138. Элемент матрицы фотокамеры

Светофильтры нужны, чтобы изображение было цветным. Наш глаз различает цвета, поскольку в нём есть три типа светочувствительных клеток – колбочек. Колбочки одного типа сильнее всего реагируют при освеще-

нии красным цветом, другого типа – при освещении зелёным цветом, третьего – синим. Светофильтры в матрице повторяют цвета, воспринимаемые колбочками, и пропускают красный, зелёный и синий цвета.

В момент съёмки на все светодиоды приходит стартовый сигнал, дающий возможность светодиодам заряжать конденсаторы. Свет, падая на светодиоды, вызывает ток, который заряжает конденсаторы, причём величина заряда зависит от интенсивности падающего света и времени освещения. Каждый конденсатор через управляющие транзисторы соединён с процессором или устройством памяти (рис. 139). Преимущество КМОП технологий в том, что сопротивление управляющей цепи практически бесконечно, и накопленный заряд может храниться долго. Теперь осталось дожидаться, когда на затвор управляющего транзистора придёт сигнал окончания съёмки, и напряжение на конденсаторе попадёт на АЦП, а затем в процессор и запоминающее устройство.



*Рис. 139. Структура матрицы фотокамеры*

После того, как данные считаны, осталось с помощью другого управляющего транзистора обнулить напряжение на конденсаторе, и ячейка матрицы готова к работе.

КМОП – матрица в пассивном режиме практически не потребляет энергию, поэтому её можно использовать для автономной работы датчиков наблюдения, которые ведут запись только при движении объектов. Данные с матрицы могут считываться в произвольном порядке, что позволяет сначала быстро получать картинку низкого разрешения. Картинка низкого разрешения выводится на экран камеры, а также используется для замера освещённости и наведения на фокус.

Быстродействие современных электронных схем позволяет не только быстро сделать фотографию или последовательность фотографий, но и видеозапись.

Таким образом, фотография или видеозапись представляет собой последовательность большого числа цифр. Далее эти цифры можно вывести на экран монитора и получить изображение.

Экран состоит из большого числа пикселей – ячеек красного, зелёного и синего цвета. По начальным буквам названий цветов: красный – *Red*, зелёный – *Green* и синий – *Blue*, такие мониторы называют *RGB*. Раньше мониторы представляли собой вакуумные электронные трубки, но сейчас практически все мониторы жидкокристаллические. Остановимся на этом подробнее.

## ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

Жидкие кристаллы, как и полупроводники, были экспериментально открыты значительно раньше, чем учёные смогли объяснить их свойства и сумели их использовать.

Считается, что жидкие кристаллы открыл в 1888 году австрийский ботаник Фридрих Рейнитцер (*Friedrich Reinitzer*, 1857 – 1927). Он обратил внимание, что у кристаллов холестерилбензоата и холестерилацетата существуют два разных жидких состояния – мутное и прозрачное. Но это открытие тогда не вызвало интереса.

В 1927 году советский физик Всеволод Константинович Фредерикс (1885 – 1943), работая в ленинградском Физико-техническом институте, открыл так называемый «переход Фредерикса» – изменение оптических свойств жидких кристаллов под действием сильного электрического или магнитного поля. К сожалению, в 1936 году Фредерикс был репрессирован, и теоретическое объяснение переходов Фредерикса в жидких кристаллах дал французский физик Пьер Жиль де Жен



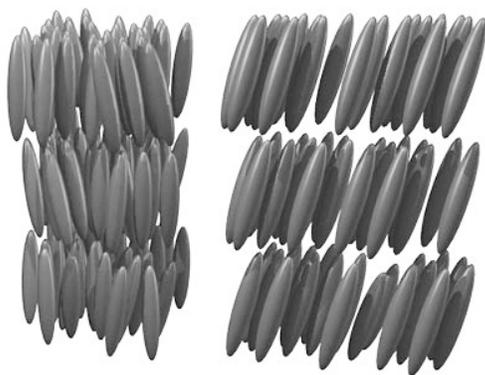
*Всеволод Константинович Фредерикс (1885 – 1943)*



*Пьер Жиль де Жен  
(Pierre-Gilles de Gennes,  
1932 – 2007)*

(*Pierre-Gilles de Gennes*, 1932 – 2007), за что был удостоен Нобелевской премии по физике в 1991 году.

Жидкие кристаллы представляют собой длинные органические молекулы, которые способны соединяться друг с другом, образуя упорядоченные структуры, как показано на рис. 140. Связи между молекулами не очень крепкие, гораздо слабее, чем в твёрдом теле. Поэтому такие вещества проявляют свойства жидкостей: они не имеют своей формы и растекаются. Именно отсутствие крепких связей делает жидкие кристаллы незаменимыми индикаторами внешних воздействий. В твёрдом теле молекулы жёстко связаны друг с другом и электрические и магнитные поля не могут сильно изменить их структуру. В жидких кристаллах молекулы достаточно свободно перемещаются друг относительно друга, поэтому воздействие температуры, электрического или магнитного полей могут существенно изменить их структуру. От структуры зависят многие свойства жидких кристаллов, например, способность отражать свет.



*Рис. 140. Жидкие кристаллы*

Существует много методик использования жидких кристаллов в дисплеях. Разные фирмы по-разному решают технические проблемы, используя различные типы жидких кристаллов и способы управления ими. Общий

принцип такой: ячейка с жидким кристаллом находится между прозрачными электродами. Электроды крепятся к прозрачным поверхностям (пластиковым или стеклянным). Экран освещается. В некоторых моделях часов, калькуляторов и др. в целях экономии батареек подсветку экрана не делают, используя отражённый от экрана дневной свет. При подаче напряжения на ячейки жидкие кристаллы меняют свои оптические свойства, и мы видим на экране светлые и тёмные пиксели. В цветных дисплеях используют *RGB* ячейки с фильтрами красного, зелёного и синих цветов.



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Будьте аккуратны при использовании жидкокристаллических матриц! Не роняйте их, они очень хрупкие! При сильном нажатии возможен необратимый выход ячейки из строя! При необходимости ставьте защитное стекло.

Жидкокристаллические экраны чувствительны к изменению температур. Рабочий диапазон температур указан в описании. Не работайте при низких температурах!

## ИТОГИ IX ГЛАВЫ

Потребность в вычислительной технике ощущалась ещё до XX века. С появлением транзисторов, а затем и микросхем электронно-вычислительные машины (компьютеры) в миллионы раз увеличили свою производительность, уменьшились в размерах и стали персональными. Теперь изобретателям нужно было позаботиться, чтобы компьютеры были не только быстродействующими, но ещё и удобными для своих не профессиональных пользователей.

## ГЛАВА 10. ВСЁ УДОБНЕЕ И УДОБНЕЕ

*Мечтают два лентяя.*

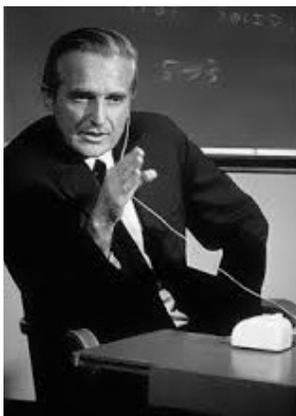
*– Хорошо бы иметь устройство: нажал кнопку – и оно приготовило бы еду, вымыло пол и посуду.*

*– А ещё хорошо бы иметь устройство, которое нажимало бы эту кнопку.*

*(из анекдота)*

Компьютеры становятся всё удобнее в использовании. У механических арифмометров нужно было вручную вращать диски с цифрами. В первых электронных компьютерах данные вводили с помощью рядов переключателей, положения которых означали «1» и «0». Затем появилась клавиатура, пришедшая из мира пишущих машинок. Но когда на экране захотелось не только писать, но и рисовать, понадобились уже устройства графического ввода.

В 1961 году американский изобретатель Дуглас Карл Энгельбарт (*Douglas Carl Engelbart*, 1925 – 2013) предложил рисовать изображения с помощью устройства, которое сейчас мы называем компьютерной мышью. Этот привычный сейчас атрибут компьютеров Энгельбарт создал на основе чисто механического устройства – планиметра, прибора для измерения площади. Планиметром нужно было обводить фигуру по периметру. У него было два взаимно перпендикулярных колеса. Первоначально у мыши тоже было два колеса, горизонтальное и вертикальное, чтобы можно было определять координаты мыши. Показания колёс по проводу передавались на компьютер, и на экране отображалось движение курсора. Первоначально Энгельбарт планировал расположить на мыши 10 кнопок, но ограничился тремя.

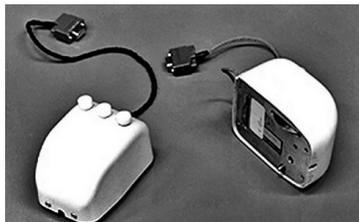


*Дуглас Карл Энгельбарт  
(1925 – 2013)*

Создание компьютерной мыши потребовало много времени, и она была представлена публике только в 1968 году (рис. 141). Нужно

заметить, что Энгельбарт также создал графический и текстовые редакторы, гипертекстовые ссылки и многие другие удобства для работы на компьютере.

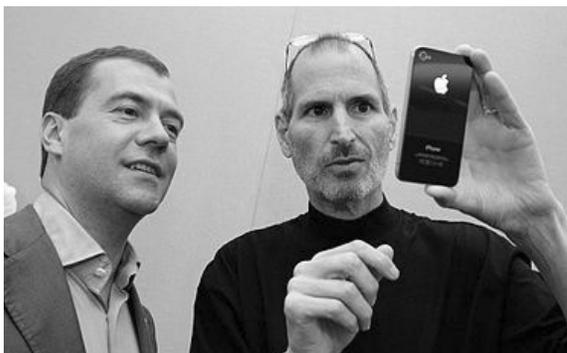
К великому разочарованию Энгельбарта, его творчество оказалось не востребовавшимся. Надо заметить, что мышь работала очень неточно, координаты курсора можно было менять, передвигая мышь по вертикали или горизонтали, но не по диагонали.



*Рис. 141. Первая компьютерная мышь (1968)*

Частично эти недостатки исправил сотрудник Энгельбарта Уильям Инглиш (*William English*, род. 1938), но возникли новые проблемы – высокая стоимость. В 1981 году вышел первый персональный компьютер с мышью – *Xerox 8010*, причём мышь стоила \$400.

Здесь мы опять возвращаемся к проблеме гениальной личности и коллективного творчества. Энгельбарт придумал великолепное устройство, но у него не было команды для воплощения его в жизнь. Идея мыши понравилась другому гениальному инженеру Стиву Джобсу (*Steve Jobs*, 1955 – 2011), основателю компьютерной фирмы *Apple*. Инженеры *Apple* сделали невозможное – довели в 1983 году стоимость мыши до \$25 (оставив только одну кнопку). Мышь стала частью персонального компьютера *Lisa*.



*Стив Джобс демонстрирует iPhone IV президенту России Дмитрию Медведеву (Кремниевая Долина, 23.06.2010)*

Механические мыши имели существенный недостаток – им требовалась очень чистая не ворсистая поверхность, в противном случае датчики быстро грязнились и мышь выходила из строя. Успех на рынке персональных компьютеров побудил инженеров к новым решениям. Уже в начале 1980-х годов создаются оптические мыши. Отсутствие механических деталей делает их более надёжными, но существенно более дорогими. Кроме того, оптические мыши первого поколения использовали специальные коврики, на которые были нанесены горизонтальные и вертикальные полоски. Полоски были настолько мелкие, что воспринимались глазом, как серая однородная поверхность. При перемещении мыши чередование отражения луча от светлых полосок и отсутствие отражения от чёрных полосок позволяло определить изменение координат мыши. Но осталась проблема чистоты поверхности ковриков. В конце 1990-х годов появились оптические мыши второго поколения, которые используются и в наше время.

Большинство пользователей мышей даже не подозревает насколько сложно устроены оптические мыши второго поколения. В каждой мыши находится миниатюрная КМОП – видеокамера и система распознавания образов. Камера за секунду делает более тысячи снимков участка поверхности под мышкой, анализирует снимки в режиме реального времени и отслеживает перемещения рисунка. Распознающий образы процессор находится внутри мыши и не требует затрат времени центрального процессора компьютера. Даже чистая белая бумага имеет достаточно микроскопических неровностей и просто пылинок, чтобы мышь могла определять изменение своего положения. Проблемы у мыши второго поколения возникают, если водить её по стеклу и другой зеркальной поверхности без мелких дефектов. Источником света для мыши служит либо светодиод, либо (в более поздних моделях) миниатюрный лазер. Добавим, что в результате развития беспроводной связи современные мышки лишились своего главного атрибута – длинного хвостика. Зато у современных мышей появился новый элемент – колёсико для прокрутки текста. За всеми новыми тенденциями угнаться невозможно. Одна из них – полностью освободиться от механических деталей – даже кнопки сделать сенсорными, т.е. чтобы пальцы только дотрагивались до кнопок, а не нажимали их.



#### ПРАКТИЧЕСКИЙ СОВЕТ

Если у Вас плохо работает оптическая мышь, смените используемую для мыши поверхность. Избегайте стеклянных

и зеркальных поверхностей, рисунков со многими мелкими контрастными объектами. Лучше всего приобрести коврик для мыши.

## СЕНСОРНЫЙ ЭКРАН

Ещё одно удобство, которое прочно вошло в нашу жизнь – это сенсорный экран. Сегодня мы привычно водим пальцами по смартфонам, планшетах, компьютерам, не задумываясь, как экран распознаёт положение одного и более пальцев (для расширения экрана нужно провести одновременно двумя пальцами).

Первые сенсорные экраны появились очень давно – ещё в начале 1970-х годов. На экран крепилась тонкая гибкая мембрана. Мембрана отделялась от экрана изолятором. И на экран, и на мембрану наносилось покрытие с небольшим сопротивлением. При нажатии на мембрану контакт замыкался (рис. 142). Экран окружало четыре электрода, и по величине сопротивления между электродами и мембраной определялось место касания экрана.

По другому пути пошли инженеры американской фирмы *CDC (Control Data Corporation)*. Эта фирма с 1960 года производила терминалы для электронного обучения *PLATO* (от англ. *Programmed Logic for Automated Teaching Operations* – программный алгоритм для автоматизированных операций преподавания). Надо заметить, что система *PLATO* была внедрена как реакция на запуск СССР в 1957 году первого спутника. США обеспокоились отставанием от СССР в области образования и решили провести реорганизацию. Компьютерное обучение стало частью образовательной реформы. В четвёртой версии (*PLATO IV*, 1972 год) была установлена сетка, сформированная шестнадцатью горизонтальными и вертикальными инфракрасными лучами. При касании экрана луч прерывается, а контроллер определяет

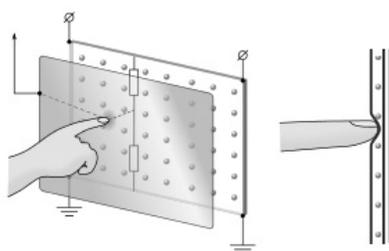


Рис. 142. Сенсорный экран

на запуск СССР в 1957 году первого спутника. США обеспокоились отставанием от СССР в области образования и решили провести реорганизацию. Компьютерное обучение стало частью образовательной реформы. В четвёртой версии (*PLATO IV*, 1972 год) была установлена сетка, сформированная шестнадцатью горизонтальными и вертикальными инфракрасными лучами. При касании экрана луч прерывается, а контроллер определяет



Рис. 143. Инфракрасный сенсорный терминал PLATO IV

место, в котором луч был прерван. Разрешение экрана у *PLATO IV* было всего 16 x 16 (рис. 143), но это позволяло выбирать ответ, нажимая на нужное место экрана. Но распространения эти системы не получили, прежде всего, из-за малой точности определения координаты. Только в 1983 году компания *Hewlett-Packard* (известная больше по аббревиатуре *HP*) выпустила на рынок компьютер *HP-150* с сенсорным дисплеем на основе инфракрасной сетки.

Но настоящее завоевание рынка сенсорными экранами произошло в 2007 году, когда уже знакомая нам фирма *Apple* создаёт телефон с сенсорным экраном – *iPhone*. Успех *iPhone* побудил других производителей делать телефо-

ны, планшеты, фотоаппараты и др. электронную технику с сенсорными экранами. Наибольшее распространение получили проекционно-ёмкостные сенсорные экраны. Рассмотрим их подробнее.

Устройство таких экранов основано на том, что палец обладает определённой электроёмкостью. На внутренней стороне экрана нанесены две сетки электродов, как показано на рис. 144 – вертикальные и горизонтальные проводники, разделённые изолятором. Прижатый палец играет роль второй обкладки конденсатора (рис. 145). Электроника непрерывно подаёт импульсы тока и измеряет напряжение на электродах, и определяет место, где это напряжение изменилось.

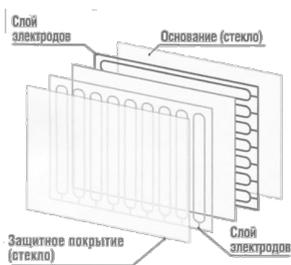


Рис. 144. Проекционно-ёмкостный сенсорный экран

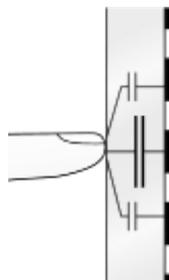


Рис. 145. Проекционно-ёмкостной сенсорный экран – палец заменяет вторую обкладку конденсатора

Проекционно-ёмкостные сенсорные экраны имеют огромные преимущества перед другими видами экранов. Поскольку все компоненты спрятаны под стеклом, им не страшны пыль и влага, они могут работать в широком диапазоне температур, срок действия практически неограничен. Непроводящее ток загрязнение им тоже не страшно, поскольку оно не влияет на изменение ёмкости. Толщина стекла может достигать 2 см, – это позволяет защищать экраны от вандалов и использовать их в уличных терминалах. С другой стороны, вместо стекла можно использовать тонкие гибкие полимерные плёнки. Система позволяет различать касание двумя и большим числом пальцев (так называемый *multi-touch* - «множественное касание»), что создаёт дополнительные функции управления экраном (изменение масштаба и др.). Основная проблема – это размещение на экране сетки электродов так, чтобы они не загромождали свет, но с развитием технологий эта проблема была решена – производимые сейчас экраны пропускают 90% света.

Большинство производимых сейчас сенсорных экранов являются проекционно-ёмкостными. Они применяются в *iPhone*, *iPad* и др. подобных устройствах.

## ХРАНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ

Ещё одна важная задача – это хранение информации. В первых компьютерах (а ещё раньше – в ткацких станках) информация хранилась на перфолентах, позже на перфокартах. Но для хранения даже одного килобайта информации нужна пачка перфокарт, как же хранить мегабайты, а тем более гигабайты? Можно хранить информацию на магнитной ленте. Магнитные ленты позволяют хранить сколь угодно много информации, особенно если компьютер можно подсоединить сразу к большому числу устройств чтения лент.

Но у магнитных лент очень низкая скорость чтения, особенно если информация записана кусками на разных частях ленты, и для чтения ленту нужно всё время перематывать туда-сюда. На смену магнитным лентам пришли магнитные диски (жёсткие диски) – здесь время доступа до любого участка диска мало, поскольку считывающие информацию магнитные головки можно мгновенно передвинуть в любое место диска. Сейчас это сложно себе представить, но всего 40 лет назад, устанавливаемый на пер-



Рис. 146. Жёсткий диск на первых IBM PC (1980), диаметр 5 дюймов, ёмкость 5 Мб.

вых персональных компьютерах диск диаметром 5 дюймов (12 см), массой 3 кг, ёмкостью всего 5 Мб (миллионов байт) и стоимостью \$1700 выглядел, как чудо техники (рис. 146). Теперь уже никого не удивляют гигабайтные (миллиарды байт) и даже терабайтные (тысячи миллиардов байт) диски.

Но у магнитных дисков есть серьёзный недостаток. Намагниченный участок диска (так называемый домен) сохраняет информацию сколь угодно долго, но диски очень хрупкие. Стоит диск уронить на пол, и магнитные головки могут навсегда выйти из строя. Есть ли более надёжные способы хранить информацию?



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Жёсткие диски очень хрупкие. Обращайтесь с ними очень осторожно! Не ударяйте, не роняйте их на пол. Жёсткие диски обычно рассчитаны на работу только в строго горизонтальном или строго вертикальном положении, но не под углом! Во время работы компьютера диск нельзя наклонять! Это может привести к выходу диска из строя!

## ЛАЗЕРНЫЙ ДИСК



Рис. 147. Лазерный диск

Другим способом хранения информации стала запись на оптический диск, он же лазерный диск или компакт диск (*CD – Compact Disc*). Пятидюймовые диски (120 мм в диаметре) стали производиться в 1980 году двумя фирмами *Philips* (Нидерланды) и *Sony* (Япония). Первоначально диск предназначался для хранения музыки, но потом стал использоваться и в компьютерах.

Устройство компакт диска очень простое (рис.

148). Диск состоит из прочной непрозрачной пластиковой (поликарбонатной) пластины (рис. 148, верхний слой), на которую нанесён тонкий слой алюминия (реже серебра или золота). Снизу слой алюминия защищён слоем прозрачного лака – полиакрилата (рис. 148, нижний слой). На металлическую поверхность по спирали лазером выжигаются микроскопические углубления, расположение которых определяет содержание записанной информации. Считывающее устройство представляет собой инфракрасный лазер (длина волны 780 нм) и датчик, принимающий его отражение (рис. 148, снизу). В зависимости от того, попал луч лазера на «бугор» или в «углубление», на принимающий датчик возвращается то интенсивный, то практически нулевой отражённый луч лазера. Последовательность интенсивных и почти нулевых отражённых лучей образуют цепочку «нулей» и «единиц», передаваемых из считывающего устройства на компьютер. Первоначально на такой диск можно было записать до 650 Мб информации, позже появились *CD* – диски объёмом до 800 Мб.

Записываемые и перезаписываемые диски устроены чуть сложнее, но принцип чтения информации остаётся тем же.

Хранимой на *CD* - дисках 800 Мб информации хватало для воспроизведения аудио, но не для просмотра видеофильмов (в хорошем качестве). В 1995 году начинается производство *DVD* – дисков (*Digital Video Disc*). *DVD* – диск в принципе устроен также, как и *CD* – диск, только считывающее устройство использует не инфракрасный, а красный лазер с меньшей длиной волны (650 нм), что позволяет делать дорожки

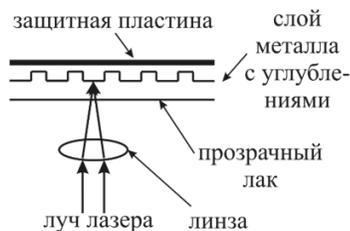


Рис. 148. Чтение информации с лазерного диска

более узкими и размещать на диске больше элементов – до 4,7 Гб (гигабайт, т.е. миллиардов байт) информации. Для увеличения объёма делают двухсторонние *DVD* – диски. Кроме этого, в 2000 году были разработаны *Blu-ray* – диски (от англ. *blue ray* – синий луч). Для их записи/чтения используют коротковолновые фиолетовые (405 нм) лазеры. Такие диски могут содержать 25 Гб информации, а многослойные – ещё больше. Но в настоящее время *Blu-ray* – диски не получили широкого распространения из-за высокой стоимости.

Лазерные диски (*CD* и *DVD*) оказались очень удобны – они ударопроч-

ные, лёгкие (около 15 г), недорогие и простые в эксплуатации. Недостатком является то, что они чувствительны к загрязнению поверхности и царапинам. Даже просто отпечатки пальцев затрудняют воспроизведение. Диск записывается с помощью специальных математических алгоритмов с избытком информации, поэтому если царапин немного, диск может успешно читаться. Но при большом количестве царапин диск выходит из строя. Кроме этого и диски, и воспроизводящее устройство слишком велики для современной «карманной» электронной техники. Поэтому в настоящее время лазерные диски постепенно уступают место устройствам памяти на полупроводниках.



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Аккуратно обращайтесь с лазерными дисками! Не трогайте руками рабочую поверхность, не пачкайте, не царапайте диски! Не разбирайте устройства чтения лазерных дисков, там находится источник лазерного излучения!

## FLASH-память

Появление КМОП – технологий с огромным входным сопротивлением заставил инженеров задуматься о создании энергонезависимой памяти. И здесь, как это часто бывает, помог случай. Американско-израильский инженер Дов Фруман-Бенчковский (*Dov Frohman-Bentchkowsky*, род. 1939) работал в фирме *Intel* и изучал дефекты в интегральных схемах. Неожиданно он обнаружил, что транзисторы с разрушенными затворами могут содержать электрические заряды. Получалось, что электроны могут просачиваться в затвор через изолятор (оксид кремния). В 1971 году Фруман-Бенчковский разработал ячейку памяти на основе КМОП-транзистора с, так называемым, *плавающим затвором*. Схема ячейки представлена на рис. 149. Основная идея заключается в том, чтобы полностью изолировать затвор, как от канала «исток – сток», так от управляющего напряжения. В результате получается участок полупроводника (кремния или германия) полностью изолированный от остальной схемы. Какой же смысл в полностью изолированном плавающем затворе?

Дело в том, что при определённом напряжении электроны проходят или, как говорят в квантовой механике, *туннелируют* через тонкий слой изо-

лятора, и оказываются в плавающем затворе. Попав в плавающий затвор, электроны уже не могут его покинуть, и заряд на затворе может оставаться сколь угодно долго. Но как узнать, есть заряд в плавающем затворе или нет? Очень просто. Нужно включить напряжение между истоком и стоком и подать отпирающее напряжение на второй затвор. Если транзистор откроется (рис. 149, справа), значит заряда нет, если не откроется – ему мешает заряд на плавающем затворе.

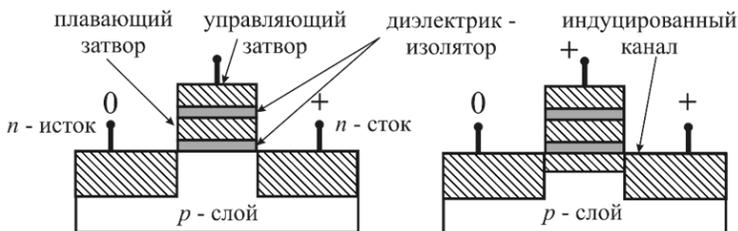


Рис. 149. Транзистор с плавающим затвором

Подобные микросхемы памяти получили название *PROM* (*Programmable Read Only Memory* – постоянная программируемая память). Их использовали в компьютерах в качестве постоянного запоминающего устройства. При изготовлении устройства в ячейке памяти накапливали заряд, который сохранялся десятилетиями и мог считываться любое число раз.

А можно ли убрать заряд с плавающего затвора? Можно, осветив его ультрафиолетовым светом. Правда при этом заряды убираются сразу из всех ячеек памяти на микросхеме. Впрочем, ультрафиолет частично разрушает тонкий изолирующий слой, и операцию стирания можно было выполнить ограниченное число раз (порядка тысячи). Такие микросхемы с прозрачным окошком для ультрафиолета получили название *EPROM* (*Erasable Programmable Read Only Memory* – постоянная программируемая память с возможностью стирания).

Стирать память ультрафиолетом было неудобно и усилия инженеров были направлены на возможность управлять ячейками памяти электрическими сигналами. Началась гонка: кто первый запатентует подходящее устройство. И снова фирма *Intel* оказалась на высоте. В 1978 году инженер Джордж Перлегос (*George Perlegos*, род. 1950) представил микросхему с более тонким слоем затвора, получившую название *EEPROM* (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory* – постоянная



Фудзю Масуока  
(род. 1943)

программируемая память с возможностью электрического стирания). Но успех был не полным, ему не удалось получить плотной упаковки микросхем. *Flash* – память в почти современном виде создал японский инженер Фудзю Масуока (*Fujio Masuoka*, род. 1943) из фирмы *Toshiba* в 1984 году.

Принцип работы флэш памяти показан на рис. 150.

Для записи нужно создать большой ток. Для этого между стоком и истоком создаётся напряжение 7 В, а на затвор подаётся положительное напряжение. Транзистор открывается, между истоком и стоком течёт большой ток, электроны туннелируют к затвору, и плавающий затвор приобретает заряд (рис. 150, слева). Для стирания памяти положительный заряд подаётся на исток, на затвор же подаётся отрицательное напряжение и электроны туннелируют к истоку (рис. 150, справа). Чтение ячеек памяти производится также, как и у первоначальных ячеек *PROM*.

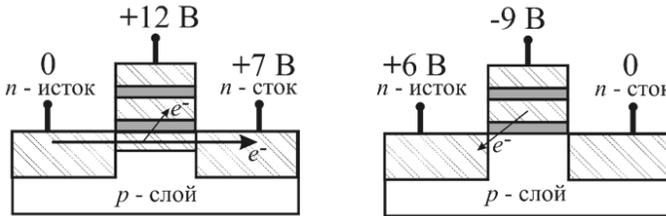


Рис. 150. Принцип работы флэш-памяти, слева – запись, справа – стирание информации

Важно заметить, что *flash* – память является энергонезависимой, т.е. информация может храниться долго (месяцы) при отсутствии питания, но запись (перезапись) информации требует энергозатрат. На время хранения информация влияют внешние факторы. Повышенная температура, радиация и др. внешние воздействия могут привести к потере информации. Скачки напряжения могут вывести из строя блоки памяти или даже всю флешку. Поэтому извлекать флешки можно только когда компьютер к ней не обращается. Для этого существует специальная команда для из-

влечения флешек.

Считывание информации – проверка того, есть ли в плавающем затворе заряд, может производиться неограниченное число раз. Туннелирование электронов связано с разрушением слоя оксидной плёнки, и может проводиться ограниченное число раз. Правда в современных схемах это число достаточно велико – около 100 000 циклов перезаписи.

Первоначально каждая ячейка хранила только один бит информации – заряд на плавающем затворе либо есть, либо отсутствует. Позже с целью повышения ёмкости носителей появились многобитовые ячейки памяти, в которых можно записать несколько уровней заряда: 0 и ещё три значения. В таких ячейках памяти может храниться два бита информации. Но они требуют больше времени для перезаписи и допускают меньшее число циклов перезаписи (порядка 10 000). Сейчас начат выпуск ячеек памяти, которые имеют 8 уровней заряда и несут три бита информации. Большинство современных *USB* – флешек и *SD* – карт имеют многоуровневую структуру.



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Не храните на *flash* – носителях уникальную информацию – делайте копии, число перезаписей на *flash* – носителях ограничено! Копируйте всю информацию при первых признаках сбоя флешки! Не используйте флешки для длительного (несколько месяцев) хранения информации! Не извлекайте флешки из компьютеров, не подавайте команды для их извлечения!

## СВЧ-печь (МИКРОВОЛНОВКА)

Можно ли с помощью радиоволн передавать не только информацию, но и энергию? Конечно, можно. Об этом знал уже Генрих Герц, ведь радиоволны вызывали искру в его приёмнике. Радиоволны могут также разогреть еду. Сейчас нальчим микроволновки в квартире никого не удивишь, а ведь совсем недавно (каких – то 80 лет назад) о такой возможности даже не подозревали.

Как и многие другие изобретения своему созданию микроволновки обязаны случайности. Американский инженер Перси Спенсер (*Percy Spencer*;

1894 – 1970) с 1925 года работал в фирме «Raytheon», занимавшейся изготовлением радаров для противовоздушной обороны. Наступил 1945 год, приближался конец Второй мировой войны, разгромлена Германия, уже ясно, что скоро будет разгромлена Япония. Конечно, окончание войны – это хорошо, но для фирмы Raytheon мирное время означало уменьшение военных заказов на радары. Нужно было срочно найти возможность производства гражданской продукции.



*Перси Спенсер (1894 – 1970), фото 1950 года*

Однажды Спенсер случайно обнаружил, что шоколадный батончик в его кармане превратился в бесформенную массу. Можно было не придать этому значения – подумаешь, расплавилась шоколадка. Но Спенсер сразу сообразил, что шоколадный батончик расплавили испускаемые локатором радиоволны. Он принялся экспериментировать: кукурузные зёрна, помещенные перед излучателем локатора, превратились в попкорн, а куриное яйцо просто взорвалось, забрызгав всё вокруг. Спенсеру пришла в голову идея использовать магнетрон из радиолокаторов для разогрева продуктов. В том же 1945 году он получает патент, а в 1947 году фирма Raytheon начинает производить «радарные печи» для разогрева замороженных продуктов. Кроме того, в них можно было

быстро готовить сэндвичи и хот-доги. Эти печи использовали такую же длину волны, что и радары – сантиметрового диапазона. Частота таких волн – гигагерцы. Отсюда и появились названия «микроволновка» или СВЧ-печь (СВЧ – сверх высокая частота). Микроволновки тех лет были мало похожи на современные печи – размер их достигал человеческого роста, вес был 340 кг, при работе требовалось водяное охлаждение, а стоимость достигала \$3000. Понятно, что такие громадины можно было использовать только в больших столовых и ресторанах (рис. 151).

Чтобы микроволновка пришла в каждый дом, нужно было существенно уменьшить её размеры и стоимость. Прошло 15 лет, прежде чем фирма Sharp (Япония) в 1962 году начала производить малогабаритные микроволновки всего по \$300.

С этого времени микроволновки медленно, но уверенно завоёвывают рынок (рис. 152). С развитием электроники в печах появилась возможность задавать программы – сколько секунд при какой мощности разогревать, но сам принцип работы не изменился.

Как же работает микроволновка?

Основным элементом микроволновки является испускающий радиоволны магнетрон. В первой половине XX века в электронике применялось много вакуумных радиоламп. Магнетрон – это одна из немногих вакуумных радиоламп, которую не смогли заменить полупроводниковые устройства.

Общий вид магнетрона для микроволновки показан на рис. 153, а его строение – на рис. 154. В центре находится цилиндрический катод, на который подаётся сильное отрицательное напряжение. Катод окружает сложной формы анод, на который подаётся большое положительное напряжение. Между катодом и анодом создаётся сильное магнитное поле, силовые линии которого параллельны катоду. Между катодом и анодом вакуум, поэтому в «холодном» состоянии ток не идёт.

Затем катод подогревают, так, что с его поверхности начинают вылетать электроны. Электроны тут же устремляются к аноду, но магнитное поле начинает заворачивать их, на-



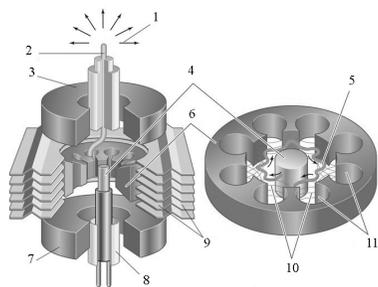
*Рис. 151. Первые микроволновки (1947)*



*Рис. 152. Реклама первых бытовых микроволновок*



*Рис. 153. Общий вид магнетрона для микроволновки*



*Рис. 154. Устройство магнетрона*  
 1 – микроволновое излучение, 2 – излучающая антенна, 3, 7 – магниты, 4 – катод, 5 – траектория электронов, 6 – анод, 8 – изолирующая керамическая трубка, 9 – охлаждающий радиатор, 10 – электромагнитные волны, 11 – полости резонаторов

ется излучающая антенна, через которую электромагнитная волна вырывается наружу и попадает в камеру для подогрева продуктов. На рис. 154 излучающая антенна расположена вверху рисунка.

Обычно в СВЧ-печах используется рабочая частота электромагнитных волн 2,5 гигагерца, что соответствует длине электромагнитной волны примерно 12 см. Точное значение частоты можно узнать из описания или на задней стенке печи.

Что же происходит с электромагнитной волной дальше? Непосредственно разогреваются молекулы воды, под действием электромагнитной волны они начинают быстро колебаться, передавая своё движение соседним молекулам, а температура как раз определяется средней скоростью движения молекул.

Кроме молекул воды электромагнитные волны взаимодействуют с металлом, причём так сильно, что могут посыпаться искры. Это неудивительно. Искры в металлическом контуре наблюдал ещё Герц. Поэтому в СВЧ-печи нельзя класть металлические предметы: ложки, вилки и даже посуду с нанесённой металлической каёмочкой.

правляя обратно к катоду. Если магнитное поле достаточно сильно, то электроны будут двигаться по сложной циклической траектории, ускоряясь и замедляясь. При замедлении каждый электрон испускает электромагнитные волны, которые влияют на движение других электронов. Кроме того, электромагнитные волны отражаются от поверхности анода. Сложная форма анода магнетрона, наличие специальных полостей (резонаторов) задаёт длину электромагнитной волны, которая установится в магнетроне, будет раскачивать электроны, что приведёт к резкому усилению колебаний именно этой длины волны. В магнетроне име-



## СДЕЛАЙ САМ

Как убедиться, что электромагнитная волна действует именно на молекулы воды? Вставьте друг в друга два картонных одноразовых стаканчика, налейте в верхний немного воды. Теперь возьмите кастрюлю для СВЧ-печи поставьте туда стаканчики, а вокруг положите кусочки сильно замороженного льда. Теперь поставьте кастрюлю в печь на минуту – полторы. Вода в стаканчике закипит, а лёд не растает (может, чуть подтает). Чтобы опыт получился, нужно, чтобы лёд был сильно заморожен и не успел подтаять, пока его ставят в печь.

Почему продукты, разогретые в СВЧ-печке, имеют другой вкус, чем разогретые на сковородке? На сковородке разогрев идёт не равномерно: сначала разогревается та часть еды, которая лежит на поверхности сковородки, затем начинают разогреваться внутренние слои. В СВЧ-печке радиоволны проникают на 2-3 см вглубь еды, поэтому разогрев идёт по всему объёму (если кусок пищи не очень большой). Однако, всё же разогрев происходит не совсем равномерно, области с большим содержанием воды разогреваются сильнее. Поэтому возможен локальный нагрев до 100°C. Произойдёт закипание и небольшой «взрыв». Поэтому в СВЧ-печке нельзя разогревать куриные (и других птиц) яйца, особенно в скорлупе. По этой же причине нельзя разогревать еду в запечатанной упаковке, она может не выдержать и разлететься! Если Вы решили разогреть или приготовить сосиски, то нужно снять полиэтиленовую плёнку.

Локальный разогрев создаёт ещё одну проблему. Если сильно разогреть участок стеклянной посуды, она может лопнуть, тогда всю пищу придётся выкинуть, поскольку попадание стеклянных осколков в желудок смертельно опасно! Поэтому для СВЧ-печки нельзя использовать посуду из обычного стекла, нужно приобретать специальную термостойкую посуду. Впрочем, фарфор более устойчив к перегреву и для СВЧ-печки можно использовать обычную фарфоровую посуду.

Для более равномерного разогрева в СВЧ-печке используют вращающиеся платформы, но от неравномерного нагрева это не всегда спасает. Отметим, что нежелательно включать пустую СВЧ-печь, поскольку электромагнитные волны будут отражаться от стенок и, в отсутствии поглощения на продуктах, могут вывести печь из строя.

Большинство бытовых СВЧ-печек имеют мощность от 500 до 2500 Вт. Но иногда возникает потребность запустить печь не на полную мощность. К

сожалению, магнетрон не может излучать маленькую мощность, поскольку при уменьшении напряжения между катодом и анодом электроны возвращаются на катод, не описывают замкнутых траекторий и не излучают электромагнитные волны. Но тем не менее, выход есть! Он заключается в том, что магнетрон работает на обычную мощность, но с перерывами в работе, то есть, в среднем, мощность излучения становится меньше.

Не вредят ли СВЧ-печи здоровью?

Простое соображение говорит, что если электромагнитные волны плавят шоколадки и др. продукты, то они также в состоянии навредить нашему организму. К счастью, при изготовлении СВЧ-печей особое внимание уделяется вопросам безопасности, чтобы электромагнитные волны не могли покинуть нагревательную камеру. Обратите внимание, что стекло СВЧ-печей закрыто металлической сеткой, не пропускающей электромагнитные волны. В некоторых моделях используют специальное металлизированное стекло. Если оно разобьётся, его ни в коем случае нельзя заменять обычным оконным стеклом, которое пропускает электромагнитные волны. Сегодня на Западе принят стандарт, по которому излучение на расстоянии 50 см от СВЧ-печей не может быть больше 0,01 милливольт на квадратный сантиметр. Печи снабжены блокировкой, не позволяющей им работать при открытой дверце.

Существует миф, что если отключить эту блокировку, то работающая СВЧ-печка с открытой дверцей может стать средством защиты от бомбардировок. Во время войны в Югославии в 1999 году сотни таких СВЧ-печек якобы сбивали с толку ракеты, которые наводились на них, принимая их за радары. Ничего невероятного в этом нет, учитывая, что магнетроны СВЧ-печек родом из военных радаров. Но действительно ли они могли сбить с толку ракеты? К сожалению, информация об этом относится к сфере военных тайн, и вряд ли мы скоро об этом узнаем.



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

СВЧ-печи требуют аккуратного обращения! Внимательно читайте инструкцию! Не включайте печку с открытой дверцей! Это опасно для здоровья! Не кладите в печку металлические предметы: ложки, вилки, посуду с нанесённой металлической каймой! Используйте только посуду для СВЧ-печи! Не разогревайте еду в герметично запечатанной упаковке! Не разогревайте яйца ни в скорлупе, ни без скорлупы! Не включайте печку пустой!

## БЕСКОНТАКТНЫЕ КАРТЫ

Сегодня использование бесконтактных карт стало привычным атрибутом нашей жизни: это банковские карты, карты оплаты в общественном транспорте, во многих учреждениях и даже школах бесконтактные карты используются как пропуск. Но разве не удивительно, что сообщения передают устройства, у которых нет источников питания? Не противоречит ли это закону сохранения энергии?

Идея создать электронные «пропуска» возникла вместе с радиолокацией. Мало заметить цель (самолёт или корабль). Прежде чем уничтожить цель, нужно понять, свой или чужой самолёт летит в небе (или корабль плывёт в море). Поэтому ещё в 1930-ые годы появляются военные системы распознавания «свой – чужой». С наземной радиостанции идёт короткий сигнал – запрос, а установленный на самолёте (корабле) ответчик (транспондер) передаёт условный код, подтверждающий, что объект является «своим». Но самолёт или корабль имеют источники питания, поэтому большого удивления их работа не вызывает.

Пионером связи без источников питания является советский учёный и изобретатель Лев Сергеевич Термен (1896 – 1993), больше известный как создатель музыкального инструмента «терменвокс». Он создал подслушивающее устройство, способное передавать человеческую речь. Устройство было сделано в виде большого деревянного орла, изображённого на большой печати США (рис. 155), и подарено в 1945 году послу США советскими школьниками. Устройство было основано на новых принципах и настолько необычно, что американские спецслужбы его не распознали, и оно несколько лет провисело в кабинете посла.

Основу устройства представляла небольшая металлическая пластина, вмонтированная в деревянную фигуру орла (рис. 156). Разговоры в кабинете вызывали звуковые волны, они приводили к колебаниям деревянной фигуры орла, которые передавались пластине, изменяя параметры колебательного контура внутри орла. На контур подавались радиоволны, настроенные на частоту контура. При изме-



*Лев Сергеевич Термен  
(1896 – 1993)*



Рис. 155. Большая печать США



Рис. 156. Резонатор в деревянном орле



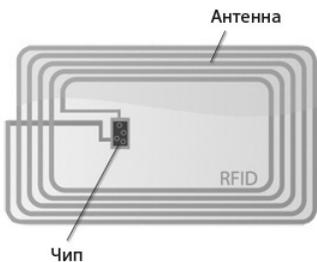
Чарльз Уолтон  
(1921 – 2011)

нении настройки контура менялись параметры поглощения – отражения радиоволн, изменялась их амплитуда, что фиксировали датчики, расположенные около посольства и, таким образом, улавливали разговоры в кабинете посла. Американцы знали, что посольство облучается коротковолновыми радиоволнами, но не понимали их назначения.

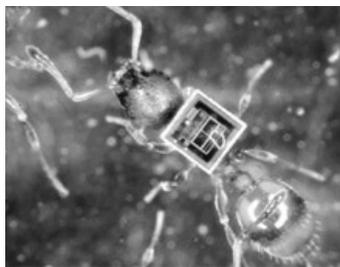
Коммерческое развитие радиочастотных идентификационных систем (англ. *RFID* – *Radio Frequency IDentification*) стало возможно после появления КМОП-микросхем с малым потреблением энергии. В 1983 году американский инженер Чарльз Уолтон (*Charles Walton*, 1921 – 2011) получает патент на компактные *RFID*-системы.

Мы прекрасно знаем, как выглядят бесконтактные карты снаружи. Что же у них внутри? Строение бесконтактных карт показано на рис. 157. Они содержат относительно большую антенну в виде спирали. Антенна необходима, чтобы электромагнитная волна от внешнего устройства по закону электромагнитной индукции создавала достаточную мощность для функционирования КМОП-микросхемы в карте, и передачу ответного сигнала.

Именно антенна ограничивает миниатюризацию радиометок, поскольку сами микрочипы могут иметь размер менее 0,1 мм и использоваться не только для банковских карт, но и вживляться под кожу животных и человека. В частности, в 2009 году учёные из Бристольского университета прикрепили *RFID*-метки к живым муравьям, чтобы изучать их поведение (рис. 158).



*Рис. 157. Структура бесконтактной карты*



*Рис. 158. RFID-карты и муравьи*

Первоначально для бесконтактных карт использовали частоту 125 – 134 кГц. В 2004 году была разработана технология ближней бесконтактной связи для кодовых замков в подъездах, пропусков, платёжных систем и др. документов. Её частота стала в 100 раз больше – 13,56 МГц. В зависимости от мощности считывающего устройства бесконтактные карты могут работать на расстоянии от нескольких сантиметров до метра.

Самые простые бесконтактные карты имеют постоянную память, которую нельзя изменить. По запросу считывающего устройства бесконтактные карты передают свой номер. Разумеется, бесконтактные карты передают свой номер за счёт энергии, которую передало им считывающее устройство. Очевидный недостаток – это возможность «подслушать» передаваемую картой информацию и затем изготовить копию бесконтактной карты. С подделками можно бороться. Например, можно привязать номер бесконтактной карты к фотографии владельца. Тогда при проходе человека через турникет, идентификационный номер бесконтактной карты будет передаваться на компьютер охранника, и на экране компьютера будет появляться фотография вошедшего. Охранник сразу заметит, если человек попытается пройти по подделанному пропуску. Недостатком такой системы является необходимость постоянного присутствия охранника у каждого прохода. Это неудобно, если бесконтактные карты используются не только на входе, но и для открывания дверей внутри здания.

В более сложных системах бесконтактная карта выдаёт номер в зависимости от кода запроса. Поскольку запросы всё время меняются, «подслушать» и подделать все ответы значительно сложнее, а если считывающая система делает несколько запросов, то число комбинаций

становится столь велико, что «подслушать» все ответы становится невозможным.

Транспортные карты должны иметь возможность записи информации на чип: сколько поездок было сделано и сколько осталось. Но возможность записи приводит к уязвимости. Первые транспортные карты взломали хакеры, записав туда «бесконечное» число поездок. Современные транспортные карты имеют дополнительную защиту. Разумеется, банковские карты должны быть также хорошо защищены от взлома.

Миниатюрные радиометки используются также для маркировки товаров. Они гораздо удобнее традиционных штрих-кодов, поскольку позволяют хранить больше данных, присваиваться каждому отдельному товару, а не к группе товаров. Они устойчивы к загрязнению, могут считываться с большого расстояния и вне зоны прямой видимости. После покупки их можно не уничтожать, а удалять с товаров, при необходимости перепрограммировать и использовать многократно. Для увеличения дальности приёма – передачи сигнала используют диапазон частот 860 – 960 МГц. Это позволяет сканировать товары с радиометками на расстоянии десятков метров, следить за их передвижением по складу и препятствовать воровству в магазинах.

Но развитие радиометок имеет и обратную сторону. Возникают проблемы защиты прав личности. Например, после покупки товаров с радиометками они могут не уничтожаться (случайно или сознательно), при этом владелец товара может даже не подозревать о существовании подобной метки. Если товар куплен по безналичному расчёту, то метка позволяет отследить передвижения не только товара, но и конкретной личности, чем могут воспользоваться криминальные структуры.



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Поскольку бесконтактные карты не имеют своих источников энергии, считывающее устройство при работе посылает короткий, но очень мощный импульс электромагнитного излучения. Это не полезно для организма! Прикладывайте бесконтактные карты на расстоянии вытянутой руки, не стойте вблизи считывающего устройство (валидатора)!

## GPS И ГЛОНАСС

На страницах нашей книги мы не раз видели, что многие научные открытия и технические изобретения делались в военных целях. Радиосвязь активно развивалась в годы Первой мировой войны. Создание транзисторов было вызвано необходимостью совершенствования военных радаров в годы Второй мировой войны. Также во время Второй мировой войны разрабатывались новые самолёты, ракеты и самое страшное оружие – атомное. Возникает неприятное чувство, что технический прогресс служит только целям войны. К счастью, это не так. Более того, иногда чисто военные разработки приходят на службу мирным людям.

Примером этого служит *система глобального позиционирования*. Ещё 70 лет назад никто не подозревал о том, что такое вообще может существовать, а сегодня редкий турист или автомобилист обходится без навигатора GPS или ГЛОНАСС.

Что же это за устройства?

Идея системы глобального позиционирования возникла после того, как в 1957 году в СССР был запущен первый искусственный спутник Земли (рис. 159).

В древности (некоторые и сейчас) ориентировались по звёздам. Возникает вопрос: можно ли ориентироваться по спутникам? Спутники летают по определенным орбитам. Можно ли, зная с большой точностью положение спутников, определить свои координаты? Использование спутников позволяет сделать систему *глобальной*, т.е. применимой к любой точке земного шара. Спутники имеют большое преимущество перед звёздами: звёзды видны только в безоблачную ночь. Спутники могут излучать радиоволны, которые можно принимать в любую погоду (рис. 160).

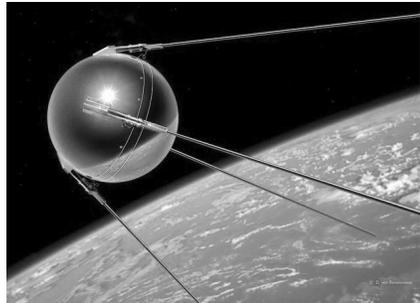
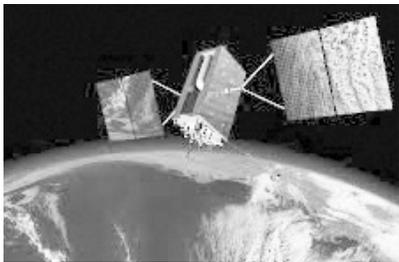


Рис. 159. Первый в мире спутник, СССР, 1957

Идея глобального позиционирования заинтересовала, прежде всего, военных. Им нужно, чтобы солдат, например, разведчик, мог определить своё положение, но при этом он не должен себя никак обнаружить. Поэтому



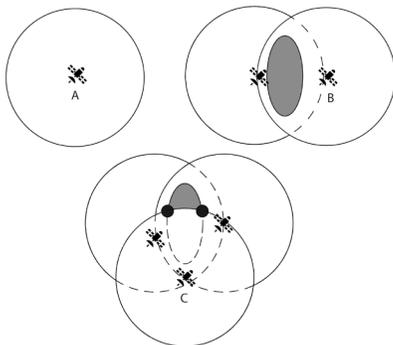
*Рис. 160. Спутник GPS*

передатчики могли стоять только на спутниках, а у солдата должен быть только приёмник.

Казалось бы, задача не очень сложная. Известно, что радиоволны распространяются со скоростью 300 тысяч километров в секунду. Можно договориться, что каждый час в 00 минут, 00 секунд (или в другое установленное время) спутник пе-

редавал бы кодированный сигнал (по коду можно определить какой именно спутник передаёт сигнал). Приёмник будет принимать этот сигнал с некоторым запазданием. По времени запаздывания сигнала мы можем определить расстояние от нас до спутника. Зная расстояние до спутника и координаты спутника, мы могли бы узнать свое местоположение.

Множество точек, удалённых от спутника на указанное расстояние – это сфера (рис. 161, сфера *A*). Как узнать, где именно на этой сфере Вы находитесь? Одного спутника явно недостаточно. Если есть два спутника, то мы уже будем знать, что находимся на пересечении двух сфер. Пересечение сфер *A* и *B* на рис. 161 (справа) показано тёмным цветом. Пересечение двух сфер – это окружность, причём достаточно большая. Если мы будем знать расстояния до трех спутников, то пересечение трёх сфер – это всего две точки. На рис. 161 (внизу) пересечение трёх сфер *A*, *B* и *C* показано тёмными точками. Скорее всего, одна из точек будет на поверхности Земли, а вторая – далеко под поверхностью или над ней.



*Рис. 161. Определение координат по трём спутникам*

Идея хорошая, только при её технической реализации, мы столкнёмся с большой проблемой. Насколько точно мы можем измерить время прихода сигнала от спутника? В повседневной жизни нам достаточно знать время с точностью до секунды. Но за одну секунду радиосигнал проходит 300 тысяч километров. Имеет ли смысл знать своё местоположение с точностью 300 тысяч километров? Чтобы определить свои координаты с точностью 100 м, нам нужно знать время прихода сигнала с точностью до одной миллионной секунды!

Но где взять часы, которые идут с такой точностью? Сегодня можно сделать атомные сверхточные часы, способные измерять время с точностью до миллиардных долей секунды, но они дорого стоят. Можно пойти на траты, чтобы запустить несколько спутников с атомными часами, но невозможно выдать атомные часы каждому солдату.

Выход из положения не так уж и сложен. Нужно использовать один из спутников для синхронизации часов приёмника. Таким образом, чтобы определить координаты, нужно принять сигналы от четырёх спутников.

Следующая проблема – система должна быть глобальной. Четыре спутника должны быть видны из *любой* точки земного шара. Геометрическое построение показывает, что для этого необходимо 18 спутников.

Осталось оснастить сверхточными атомными часами и запустить 18 спутников (лучше больше). Пусть спутники летают и в заданные моменты времени передают сигналы. У каждого солдата должен быть приёмник этих сигналов и компьютер со специальной программой, в которую заложена траектории движения спутников. Зная расстояние до спутников, компьютер вычислит координаты солдат.

Сегодня реализованы две системы глобального определения координат:

– российская ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система);

– американская *GPS* (*Global Positioning System* – система глобального позиционирования).

Обе системы были выполнены в интересах военных, прежде всего, с целью наведения ракет на цель, но теперь ими могут пользоваться не только военные, но и все желающие.

Кроме этих систем планируется создать:

- Галилео (*Galileo*) – совместный проект стран Евросоюза с участием Украины, Китая, Израиля и др.;
- *GNSS* (Китай), которая, в основном, будет обеспечивать определение координат в Китае и соседних регионах;
- *IRNSS* (Индия), предназначена, в основном, для Индии.

Рассмотрим подробнее функционирование *GPS*.

Спутники передают сигналы, содержащие коды, в которых зашифрован момент посылки сигнала. Сигналы имеют, как общедоступный открытый код, так и зашифрованные коды, которые могут использовать только военные. Теоретически, по команде с пункта управления можно прекратить посылку обычных сигналов, тогда системой *GPS* смогут пользоваться только американские военные.

Вначале *GPS* разрабатывалась, как чисто военная система. Почему же они передали систему в общий доступ? В 1983 году произошло несчастье – над территорией СССР был сбит южнокорейский гражданский самолёт, который по неизвестной причине отклонился более чем на 1000 км от маршрута. После этого с целью недопущения подобных ошибок было разрешено использовать *GPS* на гражданских самолётах. Постепенно приёмники *GPS* прочно вошли в нашу жизнь, и сейчас они установлены не только на каждом самолёте, но и практически на каждом автомобиле.

В настоящее время работу *GPS* обеспечивают 24 спутника, обращающиеся на 6 шести орбитах, по 4 спутника на каждой орбите (рис. 162). Орбиты спутников *GPS* удалены от Земли на 20000 км (орбиты ГЛОНАСС удалены примерно на 19000 км). Зачем так далеко? Ведь большинство спутников прекрасно летает всего на высоте 200 км над поверхностью Земли.



Рис. 162. Орбиты 24 спутников *GPS*

Здесь есть несколько причин. Система *GPS* проектировалась для военных целей. А в случае начала военных действий на высоте 200 км спутники более уязвимы, чем на расстоянии 20 000 км. Другая причина – в точности определения координат. Для определения своих координат приёмник должен точно знать координаты спутни-

ков. Чем дальше спутник от Земли, тем меньше его скорость, тем точнее можно вычислить его координату в момент передачи сигнала.

С какой точностью *GPS* позволяет определить координаты? Общедоступная система *GPS* позволяет определить свои координаты с точностью несколько метров. Скорее всего, военные, используя зашифрованные сигналы, могут определять координаты точнее.

Система ГЛОНАСС имеет примерно такую же точность определения координат, которая постоянно улучшается по мере запуска новых спутников.

Точность определения координат может ухудшиться по многим причинам. Выделим основные из них.

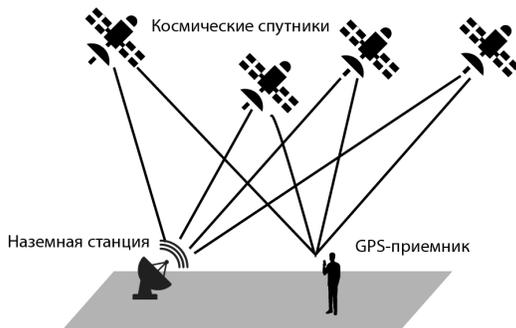
- неоднородность атмосферы, отражения в ионосфере на высоте 100 – 300 км;
- слабый уровень сигналов, гашение кронами деревьев, снегом, дождём и др.;
- отражения сигналов от зданий, холмов и пр.;
- Земля не является идеальным шаром, поэтому орбиты спутников хотя и не сильно, но всё же всё время меняются.

Нужно заметить, что ранее точность определения координат для гражданских лиц искусственно снижалась до 100 метров, чтобы *GPS* не могли использовать террористы. Но с 2000 года искусственное снижение точности было отключено, поскольку снижение точности можно было компенсировать программными способами.

Для точного определения координат в приёмное устройство нужно постоянно вносить данные с корректировкой орбит спутников. Станции наземного слежения постоянно наблюдают за движением спутников, определяя с высокой точностью их координаты (рис. 163). Таблица положений спутников называется *альманахом*, который должен храниться в памяти у каждого спутникового приёмника. Альманах обновляется каждые сутки, но для большей точности можно вводить поправки каждые 30 минут.

Если приёмник *GPS* давно не обновлялся, то для получения новой информации об альманахе ему требуется до 10 минут. Чтобы не тратить столько времени, можно воспользоваться системой *A-GPS* (*Assisted GPS* – помощник). С её помощью новый альманах можно получить не через спутник,

а по сотовой связи. Недостаток помощника *A-GPS* – он работает только в местах покрытия сотовой связью, кроме того, он может быть платным.



*Рис. 163. Корректировка данных об орбите наземными станциями*

## ИТОГИ X ГЛАВЫ

Электроника к концу XX века проникла во все сферы человеческой деятельности. С одной стороны, это сделало нашу жизнь более комфортной, с другой – мы стали очень зависимы от капризов микросхем. В книге мы постарались рассмотреть самые заметные в нашей повседневной жизни достижения. Но одно направление развития науки и техники мы пока оставляли без внимания, поскольку оно требует особого рассмотрения. Речь идёт об освещении.

## ГЛАВА 11. ЧУДЕСНЫЕ ЛАМПОЧКИ

*Ребёнок (из комнаты):*

– Мама, у нас ёлка горит!

*Мама (из кухни):*

– Ёлка не горит, а сияет!

– Мама, у нас занавески сияют!

*(из анекдота)*

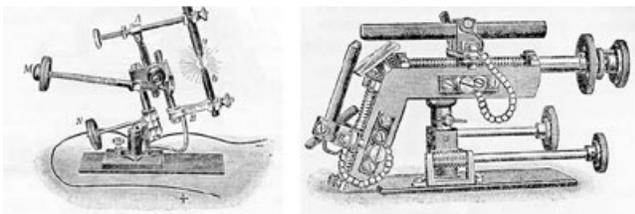
Обратим теперь взор на бесчисленное множество окружающих нас лампочек самых разных цветов, размеров и форм. История их создания повторяет историю развития науки об электричестве.

Проблема освещения помещений возникла вместе с человечеством, но ещё 150 лет назад единственным источником искусственного освещения был огонь. Костёр освещал пещеры первобытных людей, факелы из древесной коры и смолы освещали коридоры средневековых замков, длинная деревянная палочка – лучина была единственным источником света в крестьянских избах вплоть до начала XX века. Кроме дерева для получения огня с незапамятных времён использовали масляные лампы, восковые, а затем и стеариновые свечи. Как дань традиции сегодня в церквях также зажигают свечи и масляные лампы – лампадки. В некоторых монастырях до сих пор не используют электрическое освещение, чтобы сохранить особенную атмосферу льющегося из купола яркого солнечного света и тусклого отблеска свечей на подсвечниках. В пещерах Псковско-Печерского монастыря запрещено пользоваться любой подсветкой, кроме свеч. Длинные тёмные коридоры с редкими маленькими огоньками вдали создают непередаваемое ощущение важности каждого человека со свечой в руке, дающего свой маленький, но важный вклад в освещение пещер.

С появлением электричества возникли новые источники света. Развитие инженерной мысли шло сразу по нескольким направлениям.

Первое техническое направление – лампы на основе **электрической дуги**. Фактически – это развитие идеи электрической машины: при создании сильного напряжения между полюсами электрической машины проскакивает искра. Нельзя ли с помощью генератора тока эту искру сделать непрерывной? Мы уже упоминали, что сразу после того, как Вольт в 1799 году создал медно-цинковые элементы, российский учёный Василий Петров в 1802 году собрал батарею из 4200 цинковых и медных дис-

ков, и наблюдал многочисленные искры. Когда он присоединил к концам батареи угольные стержни и сблизил их, то между ними внезапно возникла яркая электрическая дуга. Чуть позже, в 1808 году уже известный нам Хэмфри Дэви также собрал электрическую дугу и назвал её «Вольтовой дугой». От научной идеи до практического внедрения лежит большая дистанция. Электрическая дуга давала яркий свет, но, к сожалению, очень недолго, угольные стержни быстро прогорали. В 1844 году французский физик Жан Бернар Леон Фуко (*Jean Bernard Leon Foucault*, 1819 – 1868) сконструировал лампу с механизмом, который позволял вручную поддерживать необходимое расстояние между концами угольных стержней (рис. 164). Отметим, что Фуко, как и многие великие учёные, обладал разнообразными талантами: в школьных учебниках Фуко обычно упоминается как создатель маятника Фуко, демонстрирующего вращение Земли.



*Рис. 164. Вольтова дуга с регулятором расстояния*

Большой вклад в развитие дуговых ламп внёс российский военный инженер Павел Николаевич Яблочков (1848 – 1894). Всё гениальное просто – он расположил угольные стержни не на напротив друг друга, а параллельно,



*Жан Бернар Леон Фуко  
(1819 – 1868)*

разделяя их непроводящим несгораемым материалом – гипсом или каолином (белая глина), как показано на рис. 165. Получилось что-то вроде свечки. По мере выгорания угля лампочка Яблочкова укорачивалась, но продолжала ярко гореть. К сожалению, даже в таком варианте электрическая дуга могла гореть только 1,5 часа. Надо заметить, что в России Яблочков не смог найти финансирование, поэтому патент на свою лампочку он получил в 1876 году в Париже, а его лампочки были впервые продемонстрированы в том же 1876 году на технической выставке в Лондоне. Лампочки

Яблочкова пользовались большим спросом, он передал свой патент французской компании Бреге, которая стала выпускать до 8 тысяч ламп в день!

Основным недостатком лампочек Яблочкова было короткое время жизни. Другая проблема была в том, что толщины углей должны быть подобраны очень точно, чтобы при выгорании их длина уменьшалась с одинаковой скоростью. Освещение с помощью электрической дуги в техническом смысле оказалось тупиком (хотя сама электрическая дуга и в наши дни широко используется для электросварки).

Второе техническое направление – **лампы накаливания**, также ведёт своё начало от времени создания элемента Вольта. С помощью электрического тока можно нагревать проводник до высокой температуры, пока тот не начнёт светиться. Ещё Вольта обнаружил, что медная проволока при пропускании тока сначала раскаляется, а затем перегорает. Чтобы сделать лампу нужно решить техническую проблему: нагревать проводник нужно до температуры более 1000°C, а большинство металлов при такой температуре начинают плавиться. Таким образом, перед изобретателями стояла задача поиска подходящего материала.

В 1838 году бельгийский изобретатель Жан Батист Марсиллин Жобар (*Jean-Baptiste-Ambroise-Marcellin Jobard*, 1792 – 1861) применил для лампы накаливания недорогой неплавкий материал – уголь. К сожалению, уголь быстро выгорал, и лампа светила около получаса. В 1840 году британский изобретатель и астроном Уоррен де ла Рю (*Warren de la Rue*, 1815 – 1889) создал лампу, пропуская электрический ток через тугоплавкую платиновую проволоку. Эта лампа не получила распространения, прежде всего из-за дороговизны платины. Уоррен де ла Рю вошёл в историю науки не как изобретатель лампы, а как астроном, который в 1853 году первым сфотографировал Луну и Солнце.

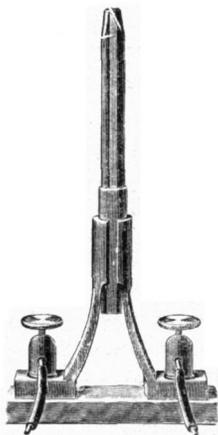
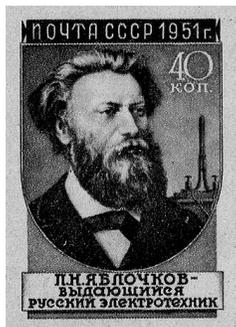


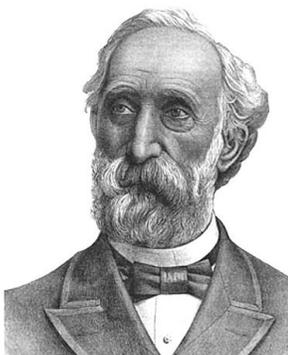
Рис. 165. Лампочка Яблочкова



Павел Николаевич Яблочков (1848 – 1894)



*Уоррен де ла Рю  
(1815 – 1889)*



*Генрих Гёбель  
(1818 – 1893)*

Невозможно упомянуть всех изобретателей, совершенствующих лампу накаливания. Одну из первых ламп, напоминающих современную, изготовил в 1854 году немецкий мастер Генрих Гёбель (*Heinrich Göbel*, 1818 – 1893). В качестве нити накаливания он использовал угольную нить из бамбука толщиной 0,2 мм. Нить он поместил в стеклянную колбу из которой откачал воздух. Угольная нить светила значительно дольше, чем все остальные металлические нити, использовавшиеся в экспериментах Гёбеля. Дальнейшее развитие ламп сдерживали сложности получения сильного вакуума, а также недостаток мощных источников электрического тока.

В 1875 году Яблочков сделал лампу накаливания, используя для нити накаливания каолин (белую глину), который не горит и не нуждается в вакууме. Первоначально Яблочков использовал каолин как изолятор для своей дуговой лампы, и обнаружил, что при высокой температуре каолин проводит ток и его можно использовать для лампы накаливания. Недостатком этой лампы было то, что она не включалась из холодного состояния, каолин нужно было вначале разогреть, например, с помощью спички. Однако Яблочков счёл это направление неперспективным и не стал заниматься производством каолиновых ламп.

Большой вклад в развитие ламп накаливания внёс российский изобретатель Александр Николаевич Лодыгин (1847 – 1923). Интересно заметить, что изобретение ламп не было главной целью Лодыгина. Его мечтой было сделать электрический вертолёт (рис. 166), а лампы нужны были для его освещения. Вертолёт сделать не удалось, а с лампами дела пошли успешно. В 1874 году он получил патент на лампу накаливания с угольной нитью в стеклянном баллоне с откаченным воздухом (рис. 167). В 1884 году он уехал в Париж и организовал производство ламп накаливания.

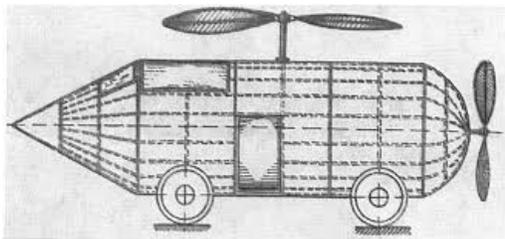


Рис. 166. Проект вертолёт Лодыгина



Рис. 167. Лампочка Лодыгина

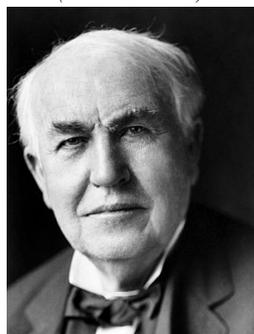
Востребованность электрических ламп обещала большую коммерческую прибыль, поэтому в этой области возникла сильная конкуренция. Наиболее успешным оказался американский изобретатель Томас Алва Эдисон (*Thomas Alva Edison*, 1847 – 1931) на счету которого более 1000 патентов в США и ещё 3000 в других странах. Мы уже говорили о его вкладе в развитии телефона, занимался он и лампами накаливания.

В 1879 году Эдисон запатентовал лампу с платиновой нитью. Но она оказалась слишком дорогой. Работоспособность и настойчивость Эдисона вызывают восхищение. Он провёл более 1000 (!) испытаний различных материалов и остановился на угле, затем он провёл около 6000 (!) опытов по получению упругих угольных нитей из различных растений и создал технологию получения угольных нитей из бамбука.

Эдисон не был первым, кто сделал лампы накаливания, но его несомненная заслуга, что он организовал их массовое производство. Эдисон провозгласил: «Мы сделаем электричество настолько дешёвым, что только богатые будут жечь свечи». Эдисон нашёл инвесторов и в 1878 году при поддержке миллиардера Дж. П. Моргана и др. основал в Нью-Йорке компанию *Edison Electric Light*, затем она в 1892 году преобразова-



Александр  
Николаевич Лодыгин  
(1847 – 1923)



Томас Алва Эдисон  
(1847 – 1931)

лась в *General Electric* – крупнейшую компанию США, действующую до сих пор.

Накануне нового 1880 года в небольшой тогда деревушке Менло-Парк (недалеко от Нью-Йорка), где жил Эдисон, тысячи человек увидели развешенными на деревьях сотни лампочек Эдисона. Его лампы горели уже до 40 часов. Улучшая качество угольных нитей и вакуума, Эдисон постоянно увеличивал срок их службы.

В 1881 году состоялась Международная электротехническая выставка в Париже. Прошло всего 5 лет, как на выставке в Лондоне впервые были представлены и вызвали восхищение лампочки Яблочкова. В Париже, хотя лампочки Яблочкова тоже получили высокую оценку, но основное внимание привлекли лампы Эдисона, которые могли светить десятки часов и требовали меньше энергии. Лампы накаливания вытеснили дуговые.

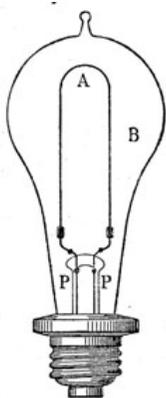


Рис. 168. Лампочка Эдисона

У Эдисона был талант не только изобретателя, но и бизнесмена. Чтобы расширить продажи лампочек (а заодно избавиться от конкурентов) Эдисон установил цену на продаваемые лампочки 40 центов при их себестоимости 110 центов. Эдисон терпел убытки четыре года (!), увеличивая производство лампочек и снижая их себестоимость. Когда себестоимость лампы упала до 22 центов, а их выпуск вырос до 1 млн, их продажа за один год компенсировала предыдущие затраты.

Эдисон не только наладил производство дешёвых лампочек, но и разработал инфраструктуру: электрогенераторы, выключатели, разветвители электрических проводов, цоколи для простой и удобной замены лампочек (рис. 168).



ЭТО ИНТЕРЕСНО  
ЧТО ЗНАЧИТ E27?

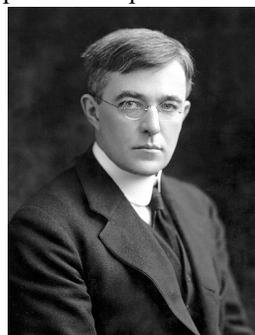
Сегодня приходя в магазин за лампочками, мы видим, в основном, лампочки с цоколями *E27* и *E14*. Цифры, как нетрудно убедиться, указывают на диаметр винтовой резьбы цоколя в миллиметрах, но что значит буква «E»? Она происходит от

«*Edison Screw*» – «винт Эдисона». Таким образом, каждый раз при покупке лампочки маркировка напоминает нам, кто изобрёл её винтовой цоколь.

Но технический прогресс не стоит на месте. Это напоминает подъём по эскалатору, который движется вниз: нужно всё время идти, чтобы хотя бы оставаться на месте. Если не модернизировать производство, то легко отстать от конкурентов. Триумф угольных лампочек был недолог. Уже в 1890-ые годы у Лодыгина возникает идея применить тугоплавкие сплавы на основе вольфрама (температура плавления свыше 3000°C). Однако вольфрам был тогда очень дорог и Лодыгину пришлось заниматься разработкой технологии электрохимического получения вольфрама. Не сумев наладить производство вольфрамовых лампочек, он продаёт в 1906 году свой патент уже упоминавшийся фирме *General Electric*. Однако, вольфрам сложен в обработке. Только после того, как в 1910 году американский инженер Уильям Кулидж (*William David Coolidge*, 1873 – 1975) изобретает улучшенный метод производства вольфрамовой нити, вольфрамовые лампочки стали широко применяться и вскоре вытеснили угольные.

Заметим, что Уильям Кулидж знаменит не только достижениями в области обработки вольфрама. В 1916 году он запатентовал улучшенную трубку для рентгеновских аппаратов, что позволило более широко применять рентген в медицине.

Долговечность вольфрамовых лампочек стала определяться скоростью испарения вольфрама в вакууме. Уменьшить скорость испарения смог американский химик Ирвинг Ленгмюр (*Irving Langmuir*, 1881 – 1957). Работая с 1909 года в «*General Electric*», он предложил наполнять лампочки негорючими газами, что существенно увеличило время их работы. Наиболее дешёвым вариантом оказалось наполнять лампу азотом или смесью азота с аргоном. В 1916 году Ленгмюр обнаружил, что вольфрамовая нить проявляет лучшие качества, если её покрыть тончайшим слоем оксида тория.



Ирвинг Ленгмюр  
(1881 – 1957)

В дальнейшем Ленгмюр продолжил исследование свойств тонких плёнок, его огромный науч-

ный вклад был отмечен присуждением в 1932 году Нобелевской премии по химии.

В дальнейшем лампочки постоянно модернизировались, но, в целом, их устройство не изменилось. Таким образом, в создании современной лампы накаливания приняло участие много изобретателей. Вольфрамовые лампочки честно служат людям и в наши дни. Сейчас их срок службы достигает несколько тысяч часов. Основным их недостатком является то, что собственно на освещение уходит 5% электроэнергии, а 95% – выделяется в виде тепла, при этом лампочки сильно нагреваются: до 200°C – 300°C, что может привести к пожару. Сейчас они уступают место более экономичным газоразрядным и светодиодным лампам. В этом направлении были даже сделаны законодательные шаги – в России был введён запрет на производство лампочек мощностью 100 Вт и больше. Но законодательные шаги часто оказываются малоэффективными, если рынок требует иного. С одной стороны, производители начали изготавливать лампочки в 95 Вт, с другой – мощные лампы накаливания стали продавать как «электронагревательные приборы». Несомненным достоинством лампочек накаливания является их дешевизна, а также возможность в широком диапазоне регулировать их яркость, изменяя напряжение. Что же касается выделения тепла, то зимой на севере и в средней полосе это является скорее их достоинством, а не недостатком.

Третье техническое направление – это **газоразрядные лампы**. Мы уже знаем, что сильное электрическое поле вызывает свечение при коронном разряде (огни святого Эльма). Напомним, что свечение возникает из-за того, что ионы (или электроны) разгоняются в сильном электрическом поле, соударяются с атомами газа, и выделяющаяся при ударе энергия может перейти в тепло, а если энергии будет достаточно, то атом может испустить частицу света – фотон (рис. 169). Насколько большим должно быть напряжение? Это зависит от длины пути, который могут пролететь ионы между соударениями (пунктирные линии на рис. 169). Чем длиннее путь, тем сильнее успеет разогнаться ион, тем больше энергии выделится при ударе. В обычных условиях в воздухе ионы могут пролететь между соударениями только тысячные доли миллиметра. Чтобы разогнать их до необходимой скорости на таком промежутке, нужны напряжения в десятки и сотни тысяч вольт, но такие напряжения слишком опасны, чтобы лампы пришли в каждый дом. Где же выход? Выход в том, чтобы понизить давление – тогда длина свободного пробега ионов увеличится и

можно будет ограничиться обычным напряжением в 220 вольт. Ещё одна проблема состоит в том, что не у каждого газа молекулы при соударении с электроном или ионом будут испускать видимый свет. Так что нужно было ещё подобрать подходящий газ.

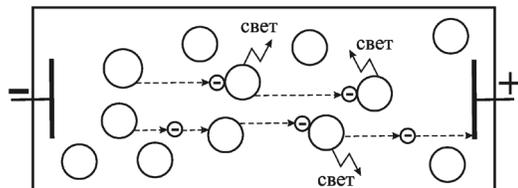


Рис. 169. Принцип работы газоразрядной лампы

Как мы уже упоминали, вакуумный насос был изобретён в 1650 году. Но в те времена ещё не было представлений об электрической природе свечения огней святого Эльма, поэтому сделать светящийся прибор можно было только случайно. Первым увидел свечение в газе при низком давлении французский астроном и священник Жан-Феликс Пикар (*Jean-Felix Picard*, 1620 – 1682). В 1675 году он ночью переносил ртутный барометр из обсерватории в порт и заметил слабое свечение. Он опубликовал свои наблюдения, но в то время их никто не смог объяснить. Сегодня эксперимент Пикара совершенно понятен. Тогда существовала единственная конструкция барометра, которую придумал итальянский физик Эвангелиста Торричелли (*Evangelista Torricelli*, 1608 – 1647). Барометр представлял собой запаянную с одной стороны трубку с ртутью, которую переворачивали над чашкой с ртутью как показано на рис. 170. По высоте столба ртути  $h$  определяли атмосферное давление (до сих пор атмосферное давление часто измеряют в миллиметрах или дюймах ртутного столба). Принято считать, что над столбиком ртути находится вакуум. На самом деле там пары ртути. Давление этих паров очень низкое, что и требуется для создания газового разряда. Но ведь никто не прикладывал к барометру напряжения! Да, но барометр стеклянный. Пикар мог потерять стеклянную трубку рукой или одеждой – образовывался заряд, который создавал на-

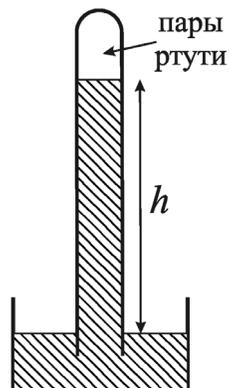


Рис. 170.

Ртутный барометр Торричелли



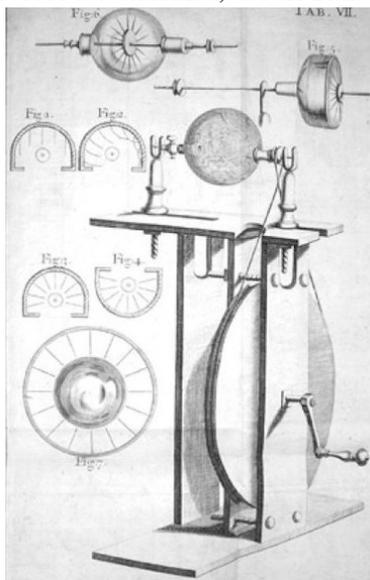
*Жан-Феликс Пикар  
(1620 – 1682)*

пряжение внутри трубки.

Таким образом, в 1675 году случайно был получен разряд в трубке с парами низкого давления. Кроме того, случайно было найдено одно из лучших веществ для получения газового разряда – пары ртути. Несмотря на свою токсичность, ртуть до сих пор используют в газоразрядных лампах. Но открытие Пикара не вызвало большого интереса. Свечение было очень слабым, и никто не смог придумать как его применить на практике.

Через 30 лет подобное явление наблюдал уже упоминавшийся Фрэнсис Хоксби (1666 – 1713). Он сконструировал электрическую машину, в которой вращался стеклянный шар с откаченным воздухом. При откачивании воздуха он использовал ртуть, и в шаре остались пары ртути. Когда в 1710 году Хоксби вращал шар на железном стержне и электризовал его трением, то внутри шара наблюдалось свечение, как показано на рис. 171. Свечение было достаточно сильным, чтобы вблизи светящегося шара можно было читать. Хоксби был настоящим учёным: он опубликовал наблюдаемое явление, всесторонне его исследовал, но ни ему, ни другим не удалось понять причины свечения. Сделанное открытие понравилось фокусникам – они использовали электрические машины, чтобы развлекать публику.

Мы уже упоминали, что великий российский учёный М.В. Ломоносов (1711 – 1765) выдвигал гипотезу об электрической природе полярных сияний. Этому предшествовало длительное наблюдение свечения разреженного воздуха в стеклянном шаре, о чём Ломоносов особо упомянул в докладе 1753 года «Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих»:



*Рис. 171. Газоразрядный шар  
Хоксби*

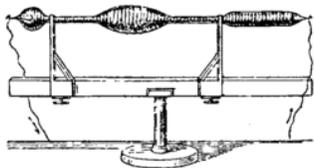
*«Итак, весьма вероятно, что северные сияния рождаются от происшедшей на воздухе электрической силы. Подтверждается сие подобием явления и исчезания, движения цвету и виду, которые в северном сиянии и в электрическом свете третьего рода показываются. Возбужденная электрическая сила в шаре, из которого воздух вытянут, внезапные лучи испускает, которые во мгновение ока исчезают и в то же почти время новые на их места выскакивают, так что бесперерывное блистание быть кажется... Все северного сияния показанные виды не могут быть пары или облака, каким-нибудь блистанием освещенные, что регулярная почти всегда фигура и сквозь светящие звезды явственно показывают...» Третьим родом электрического света Ломоносов называет: «...бледный и слабый свет, который ... над ртутью в барометре показывается...»*

Нужно заметить, что ни Хоксби, ни Ломоносов и никто из живущих в то время не помышляли использовать свечение разреженного газа в электрической машине для создания ламп. Мы уже обсуждали, что необходимые для этого источники тока появились только в XIX веке. В 1851 году Даниэль Румкорф создал катушку индуктивности, способную создавать разряды в десятки киловольт, и уже в 1855 году немецкий стеклодув и изобретатель Иоганн Генрих Вильгельм Гейслер (*Johann Heinrich Wilhelm Geissler*, 1814 – 1879) подсоединил электроды к стеклянным сосудам



*Иоганн Генрих Вильгельм Гейслер (1814 – 1879)*

различной формы с откаченным воздухом (рис. 172). Заметим, что для откачки воздуха он создал вакуумный насос собственной конструкции. Заполняя трубку Гейслера различными газами, удалось получить свечения разных цветов: аргон – голубой, пары ртути – фиолетовый, а пары натрия – жёлтый. Позже открыли газ неон, который в газоразрядной лампе светится красным.



*Рис. 172. Трубка Гейслера*

Прошло немало времени, прежде чем трубку Гейслера смогли довести до коммерческого производства. В 1891 году уже упоминавшийся Никола Тесла получил патент на систему искусственного освещения газоразрядными лампами. Но система Тесла требовала дорогие и слож-



*Питер Купер Хьюитт  
(1861 – 1921)*

ные в эксплуатации источники высоковольтного напряжения. В 1894 году сотрудник «*General Electric*» Даниель МакФарлан Мур (*Daniel McFarlan Moore*, 1869 – 1936) создал лампу на основе углекислого газа. Чтобы привлечь внимание общественности на новые лампы, был сделан, как сейчас говорят, рекламный ход. В 1898 году он с помощью своих светящихся ламп украсил свод часовни на Медисон-сквер-гарден в Нью-Йорке. Общая протяженность ламп составила 60 метров! Это сегодня мы привыкли к разноцветным рекламным плакатам на стенах домов. Но в те времена в скудно освещённом городе яркая сияющая лента стала незабываемым зрелищем.

Но в XX веке останавливаться на достигнутом нельзя. Конкуренты идут по пятам. Уже в 1901 году американский инженер Питер Купер Хьюитт (*Peter Cooper-Hewitt*, 1861 – 1921) запатентовал газоразрядную ртутную лампу. Ртутная лампа тратила меньше энергии, но давала не очень приятный сине-зелёный цвет, что делало её непригодной для освещения.

Непривычный для глаз цвет или цветовая гамма (или говоря, по-научному – спектр) газоразрядных ламп стал одним из главных препятствий для их широкого применения. Наши глаза привыкли к солнечному свету и другие оттенки освещения их быстро утомляют.

Для создания более комфортного цвета лампочек стали использовать явление *люминесценции* (от лат. *lumen* – свет). Это явление состоит в том, что некоторые вещества, называемые люминофорами, могут поглощать лучи одного цвета, а испускать – другого цвета. Французский физик Александр Эдмон Беккерель (*Alexandre-Edmond Becquerel*, 1820 – 1891) ещё в 1859 году предложил покрывать трубки Гейслера люминесцирующими веществами. Но он не стремился создать яркие источники света, поэтому его идея не дошла до стадии внедрения.

Только в 1926 году немецкий инженер Эдмунд



*Александр  
Эдмон Беккерель  
(1820 – 1891)*

Джермер (*Edmund Germer*, 1901 – 1987) с коллегами разработали систему люминесцентных покрытий для ламп. В том же году он предложил использовать ртутные лампы не низкого, а обычного давления, которые давали уже достаточное количество света, но требовали энергии меньше, чем лампы накаливания. В 1934 году компания *General Electric* купила у Джермера патент и также стала производить люминесцентные лампы (лампы дневного света). В таком виде газоразрядные лампы дошли до нашего времени, модернизировалась, в основном, электрическая система их включения.



*Эдмунд Джермер  
(1901 – 1987)*

В нашей стране большой вклад в разработку новых люминофоров внёс академик Сергей Иванович Вавилов (1891 – 1951).

Какие же главные достоинства и недостатки газоразрядных (люминесцентных) ламп?

К достоинствам можно отнести высокую эффективность: газоразрядные лампы нагреваются слабо и при той же яркости потребляют гораздо меньше электрической энергии, чем лампы накаливания. Лампы могут давать различные цветовые гаммы и служат дольше ламп накаливания (при стабильном напряжении). Ртутные лампы с кварцевым стеклом излучают ультрафиолетовый свет, поэтому их часто используют для солярия, в кабинетах физиотерапии и для уничтожения бактерий (бактерицидные лампы).



*Сергей Иванович  
Вавилов (1891 – 1951)*

Недостатки являются продолжением достоинств. Ультрафиолетовый свет убивает бактерии, но он очень вреден для глаз. На ртутные лампы с кварцевым стеклом, пропускающим ультрафиолет, нельзя смотреть без специальных очков. Можно получить цвета разных оттенков, но трудно подобрать газоразрядные лампы, которые давали бы свет, близкий к солнечному. Кроме того, газоразрядные лампы мерцают, что также утомляет глаза. Ещё одним существенным недостатком газоразрядных ламп явля-

ется то, что их трудно включить. Пока не установился устойчивый поток ионов (глюющий разряд), сопротивление ламп очень велико и нужно приложить большое напряжение именно для начального «поджига» лампы.

Для «поджига» лампы и уменьшения мерцания используют специальные стабилизаторы и электронные схемы (стартеры), дающие короткие, но мощные импульсы напряжения. Возможно, Вы замечали, что люминесцентные лампы (дневного света) перед тем как загореться несколько раз «мигают». Но эти схемы также не лишены недостатков: обычно стартеры выходят из строя быстрее, чем трубки с газом, работа стабилизаторов часто сопровождается гудением, и всё равно полного отсутствия мерцания получить не удаётся.

К недостаткам ртутных ламп, в том числе так называемых энергосберегающих, относится наличие в них ядовитой ртути и (или) её паров. Всё это привело к тому, что газоразрядные лампы постепенно вытесняются светодиодными.



#### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Большинство используемых в быту газоразрядных (энергосберегающих) ламп содержат ядовитую ртуть. Вышедшие из строя лампы следует сдавать в специальные приёмные пункты. Если лампа разбилась, следует немедленно проветрить комнату, при необходимости обработать помещение специальными реагентами (демеркуризация), которые можно приобрести в хозяйственном магазине.

Ртутные лампы с кварцевым стеклом излучают невидимый ультрафиолетовый свет, который вреден для глаз. На лампы в соляриях, в кабинетах физиотерапии, на бактерицидные лампы нельзя смотреть без специальных очков!

И, наконец, четвёртое техническое направление – это относительно недавно появившиеся в нашей жизни **светодиоды**.

Нельзя сказать, что светодиоды изобрели только вчера. Ещё в 1907 году английский инженер Генри Джозеф Раунд (*Henry Joseph Round*, 1881 – 1966), работая в компании уже известного нам Маркони, наблюдал слабое жёлтое свечение при прохождении тока через контакт металла и карбида кремния (*SiC*). Это вещество образуется в процессе высокотемпературного спекания угля и кремния, и используется в качестве шлифовального

порошка. В 1923 году эти наблюдения были повторены уже упоминавшимся российским учёным О.В. Лосевым. Лосев тщательно исследовал это явление и опубликовал результаты. Его работы получили международное признание. В 1935 году французский физик Жорж Дестрио (*Georges Destriau*, 1903 – 1960), работая в лаборатории Кюри, обнаружил свечение суспензии меди и сульфида цинка в масле под действием тока. Дестрио назвал это явление «свет Лосева» в честь российского учёного. Но обнаруженные эффекты не нашли практического применения. Как мы уже говорили, теория полупроводников в то время была развита слабо, и экспериментальные данные не находили объяснения.



Генри Джозеф Раунд  
(1881 – 1966)

После того, как были исследованы физические принципы работы *p-n* перехода, стали понятны механизмы излучения светодиодов. Не вдаваясь в детали, работу светодиода можно проиллюстрировать следующей схемой (рис. 173). Рассмотрим *p-n* переход, при движении в «прямом» направлении электроны попадают из *n*-области с избытком электронов в *p*-область с недостатком электронов (область «дырков»). Переход этот энергетически выгоден, т.е. при прохождении электрона из *n* в *p* слой выделяется энергия. Обычно это тепловая энергия, т.е. полупроводник просто нагревается. Но если энергия перехода электрона достаточно велика, то электрон может испустить частицу света – фотон. Чем больше электронов испустят фотоны, тем сильнее будет свечение светодиода.

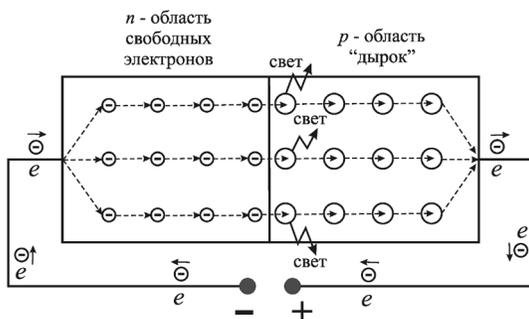
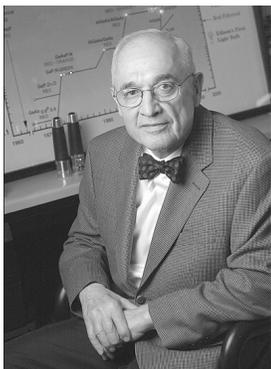


Рис. 173. Принцип работы светодиода

В теории это выглядит просто – осталось найти подходящие материалы, поскольку в кремнии электрон, проходя  $p$ - $n$  слой, не приобретает необходимой энергии. Большую работу в этом направлении провёл американский физик Рубин Брунштайн (*Rubin Braunstein*, 1922 – 2018). В 1955 году он обнаружил инфракрасное излучение у нескольких видов соединений: сплав галлия с мышьяком ( $GaAs$ ), сплав галлия с сурьмой ( $GaSb$ ), сплав индия с фосфором ( $InP$ ) и др.



*Ник Холоньяк  
(род. 1928)*

Первый диод, излучающий в видимом диапазоне (красным светом), в 1960 году получил ученик уже знакомого нам Джона Бардина, профессор Иллинойского университета (США) Ник Холоньяк (*Nick Holonyak*, род. 1928). Именно с этого времени можно отсчитывать промышленное производство светодиодов (англ. аббревиатура: *LED – Lighting Emitted Diode*). Но первые светодиоды стоили очень дорого – около \$200 – и не составляли конкуренцию лампам накаливания.



*Жорес Иванович  
Алфёров (1930 – 2019)*

Большой вклад в развитие теории полупроводников в 1960-ые годы внёс академик Жорес Иванович Алфёров (1930 – 2019), за что в 2000 году был удостоен Нобелевской премии. Благодаря работе коллектива учёных в физико-техническом институте (Санкт-Петербург) под руководством Алфёрова удалось создать светодиоды на основе соединений индия, галлия, алюминия и др., что позволило существенно увеличить световой поток и срок службы светодиодов.

Важно заметить, что  $p$ - $n$  переход очень тонкий – его толщина сравнима с размерами атомов и составляет миллионные доли миллиметра.

Поэтому светодиоды могут быть очень маленькими. Благодаря своим небольшим размерам светодиоды стали широко использоваться в приборах в качестве индикаторов. На рис. 174 показано строение обычной индикаторной светодиодной лампы размером несколько миллиметров. Цвет светодиода определяется его материалом. Для получения белого

света можно использовать одновременно несколько светодиодов разных цветов или использовать люминофоры. К сожалению, для освещения помещения эти светодиоды были слишком маломощными.

В начале 1990-х годов японские физики Исаму Акасаки (род. 1929), Сюдзи Накамура (род. 1954) и Хироси Аmano (род. 1960), получили сверхъяркие синие светодиоды на основе нитрида галлия. Все трое были удостоены Нобелевской премии в 2014 году. С 1993 года японская фирма *Nichia Chemical Industries* начала выпуск синих, а затем и белых светодиодных ламп большой яркости.

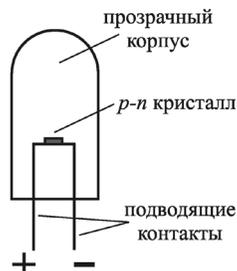


Рис. 174. Строение миниатюрной светодиодной лампы



Сюдзи Накамура  
(род. 1954)



Хироси Аmano (род.  
1960)



Исаму Акасаки  
(род. 1929)

Схема обычной осветительной светодиодной лампы представлена на рис. 175. Свет излучает  $p-n$  кристалл (светодиод), который занимает незначительную часть лампы. За светодиодом стоит отражающее зеркало, сверху лампа окружена рассеивателем света, снизу находится радиатор, который отводит избыток выделяющегося тепла. Каждая лампа содержит электрическую схему, стабилизирующую напряжение.

К достоинствам светодиодных ламп относится долгое время службы (до 70 тысяч часов), малые габариты, высокая отдача – практически вся электрическая энергия идёт на световое излучение. Они работают в широком диапазоне температур, устойчивы к влажности, механическим ударам. Кроме того, светодиодные лампы безопасны в эксплуатации: они не содержат ртути и др. ядовитых веществ, они не содержат стек-



*Рис. 175. Строение осветительной светодиодной лампы*

ла, которое может разбиться, не требуют специальной утилизации, светодиодные лампы не мерцают как газоразрядные лампы и дают ровный свет.

Единственный недостаток светодиодных ламп – это их относительно высокая стоимость, но она всё время снижается.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы прошли долгий путь по реке Времени и увидели, как разрозненные наблюдения отдельных мыслителей складывались в общую картину мира, создавались теории, возникали гипотезы, проводились эксперименты для их проверки. До середины XIX века исследования электромагнитных явлений было уделом немногих учёных, работающих в основном ради поиска истины, зачастую не получавших материального вознаграждения за свой труд. С середины XIX века научные достижения становятся частью развития техники и используются в военных и коммерческих целях.

Изобретение транзисторов, а затем и микросхем привело к цифровой революции. До 1970-х годов люди не знали о персональных компьютерах, а теперь не могут без них обойтись, как уже не могут обойтись без сотовой связи, *GPS* навигаторов и многого другого.

Развитие рынка компьютеров и другой цифровой техники стимулировало изобретение огромного числа устройств, делающих эту технику всё более удобной для эксплуатации. Но это привело к возникновению новой проблемы. С одной стороны, у современной компьютерной техники увеличивается быстродействие, растут объёмы обрабатываемой информации, её внутреннее строение становится всё сложнее и сложнее, а с другой стороны – она становится всё более простой в эксплуатации. Если представить это графически (рис. 176), то мы увидим две расходящиеся кривые – разрыв между уровнями сложности для производителя техники (рис. 176, линия 1) и для её потребителя (рис. 176, линия 2) становится всё больше и больше...



Рис. 176. Условное изображение изменения уровня сложности техники:  
1 – для производителя, 2 – для потребителя

Это приводит к тому, что многие молодые люди, освоив компьютер, как средство сидеть в интернете и проводить время в бесконечных играх, не пытаются более глубоко изучать компьютер. Их уровня знаний достаточно для нужд сегодняшнего дня, и больше им не нужно. Возникает вопрос, а кто же тогда будет производить и развивать компьютерную (и другую электронную) технику? Наша книга адресована именно тем, кто хочет знать и делать больше, чем сегодня задали в школе, кто думает о будущем дне технического прогресса. Если эта книга заинтересовала Вас, и Вы захотели больше узнать о компьютерах и других электронных устройствах, то мы выполнили свою задачу. Желаем успеха всем, кто хочет знать больше!

### **Рекомендуемая литература**

1. *Рыжиков С. Б.* Классический опыт Галилея в век цифровой техники — М.: МЦНМО, 2008. (<http://mmmf.msu.ru/lect/ryjikov/exel.pdf>)
2. *Рыжиков С. Б., Рыжикова Ю. В.* Загадочные и удивительные способности зрения. М.: Делу время, 2018. (<http://stoletov.org/biblioteka.html>)
3. *Айзексон. У.* Инноваторы. М.: АСТ, 2015.

Подписано в печать 22.12.2021.  
Формат 60×84/16. Усл. п. л. 14,75.  
Заказ №777. Тираж 150 экз.