



Исследования и разработки полупроводниковых светодиодов и перспективы их применений

А.Н. Туркин

*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова,
кафедра оптики, спектроскопии и физики наносистем*

andrey@turkin.su

Лаборатория волоконно-оптической связи и информационной оптики

Руководитель лаборатории: проф. д.ф.-м.н. Наний Олег Евгеньевич

■ Физические проблемы волоконно-оптической связи

Руководитель направления: проф. д.ф.-м.н. Наний Олег Евгеньевич

■ Физика твердотельных и полупроводниковых источников излучения

Руководитель направления: доц., к.ф.-м.н. Туркин Андрей Николаевич

Физика твердотельных и полупроводниковых источников излучения

Направления исследований:

- Исследование механизмов излучения полупроводниковых светодиодов и лазеров
- Исследования характеристик светодиодов для информационных применений и в светотехнике
- Исследование полупроводниковых гетероструктур для СВЧ-применения
- Исследование динамики излучения многомодовых твердотельных и полупроводниковых лазеров
- Исследование физических явлений в распределенных волоконно-оптических датчиках

ТЕМЫ КУРСОВЫХ РАБОТ

- Оптические и электрические свойства светодиодных гетероструктур
- Цветные светодиоды на основе полупроводниковых структур
- Светодиоды ультрафиолетовой (УФ) области спектра
- Светодиоды ультрафиолетовой (УФ) области спектра
- Светодиоды в волоконной оптике
- Светодиоды в растениеводстве и фитоосвещении
- Светодиоды в медицине
- Бактерицидное облучение на основе светодиодов

СВЕТОДИОДЫ

Светодиод (СД, англ. LED – Light-emitting diode) – полупроводниковый высокоэффективный источник света, излучающий свет при протекании через него электрического тока.

Излучаемый свет лежит в узком диапазоне спектра, его цвет свечения определяется длиной волны излучения, которая зависит от химического состава вещества полупроводника.

При протекании электрического тока в прямом направлении, носители заряда – электроны и дырки – рекомбинируют с излучением фотонов.



ИСТОРИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СД

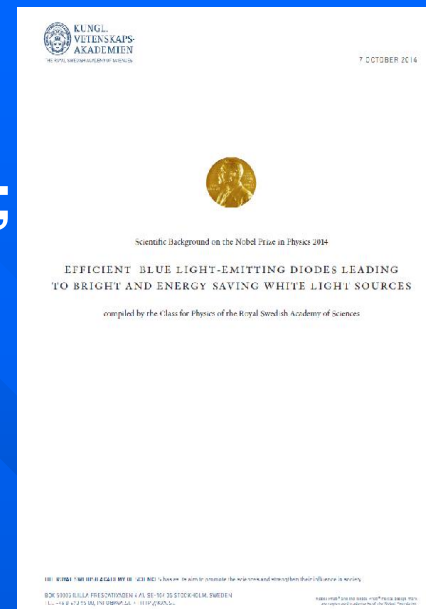
Этапы развития:

- 1907 год – Г.Дж.Раунд – свечение кристаллов SiC.
- 1923 год – О.В.Лосев – электролюминесценция в диодах Шоттки на SiC.
- 60-70 годы XX века – первые светодиоды на основе GaAs, GaP и их твердых растворов.
- 1989 год – Х.Аmano, И.Акасаки, университет Нагои – первый светодиод на основе GaN со слоем p-типа.
- 1993-1995 годы – Ш.Накамура, Nichia Chemical – первые светодиоды синего и зеленого цвета на основе гетероструктур AlGaN/InGaN/GaN.
- 1996 год – Ш.Накамура, Nichia Chemical – первый светодиод белого цвета на основе системы синий InGaN/GaN-кристалл и YAG люминофор.



Преобразование электрической энергии в световую - светодиоды

Нобелевская премия 2014 года присуждена **И.Акасаки** и **Х.Аmano** (Университет Нагоя) и **Ш. Накамура** (Университет Калифорнии, США; ранее – фирма «Ничия Кемикал», Япония) за создание ярких синих СД и, на их основе, светодиодов белого свечения. Белые СД стали основой освещения будущего, с большой экономией электроэнергии.



Исаму Акасаки



Хироси Амано



Шуджи Накамура

Isamu Akasaki (Kyoto Prize 2009), Hiroshi Amano, Nagoya University.

МОС-гидридная эпитаксия GaN через буферный слой AlN, 1986.

Пленки GaN с уменьшенной плотностью дислокаций. **Активация акцепторов Mg электронным пучком, 1988. GaN p-n-переходы. 1989 – синие СД. I.Akasaki and H.Amano, “Breakthroughs in improving crystal quality of GaN and invention of the p–n junction blue-LED”, Jpn. J. Appl. Phys. 45, 2006, 9001-9010.**

Shuji Nakamura, «Nichia Chemical»; сейчас - University of California at Santa Barbara (UCSB). Два потока газов в МОС-гидридной эпитаксии. Термическая активация Mg в N₂, 1991. Гетероструктуры InGaN/GaN. Первые коммерческие СД и лазеры, 1992-1995. Белые светодиоды, 1995. **Shuji Nakamura. “A Hystory of InGaN based LED”. “Strategies in Light”, Febr. 12-13, Santa-Clara CA. **Фундаментальная и прикладная наука – вместе!!!****

А.Э.Юнович. Светодиоды на основе гетероструктур из GaN и его твердых растворов. Светотехника, 1996 г., вып. 5/6, с. 2 -7. Лауреат Премии Киото 2009 года Исаму Акасаки и немного истории светодиодов. Светотехника, 2010, №2, с. 65-66. О.И.Рабинович, А.Э. Юнович. «Об открытии полупроводниковых источников света (к истории создания светодиодов)»; «Светотехника», 2014, №3, стр. 40-45.

Работы в МГУ

Работам И.Акасаки и Х.Аmano предшествовали работы группы сотрудников кафедр электроники (Г.В.Сапарин) и физики полупроводников (М.В.Чукичев) физического факультета МГУ (1981-82 гг.). Активация акцепторов цинка Zn в GaN электронным пучком в растровом электронном микроскопе. Патент на запись информации с разрешением <1 мкм.



Г.В.Сапарин
М.В.Чукичев

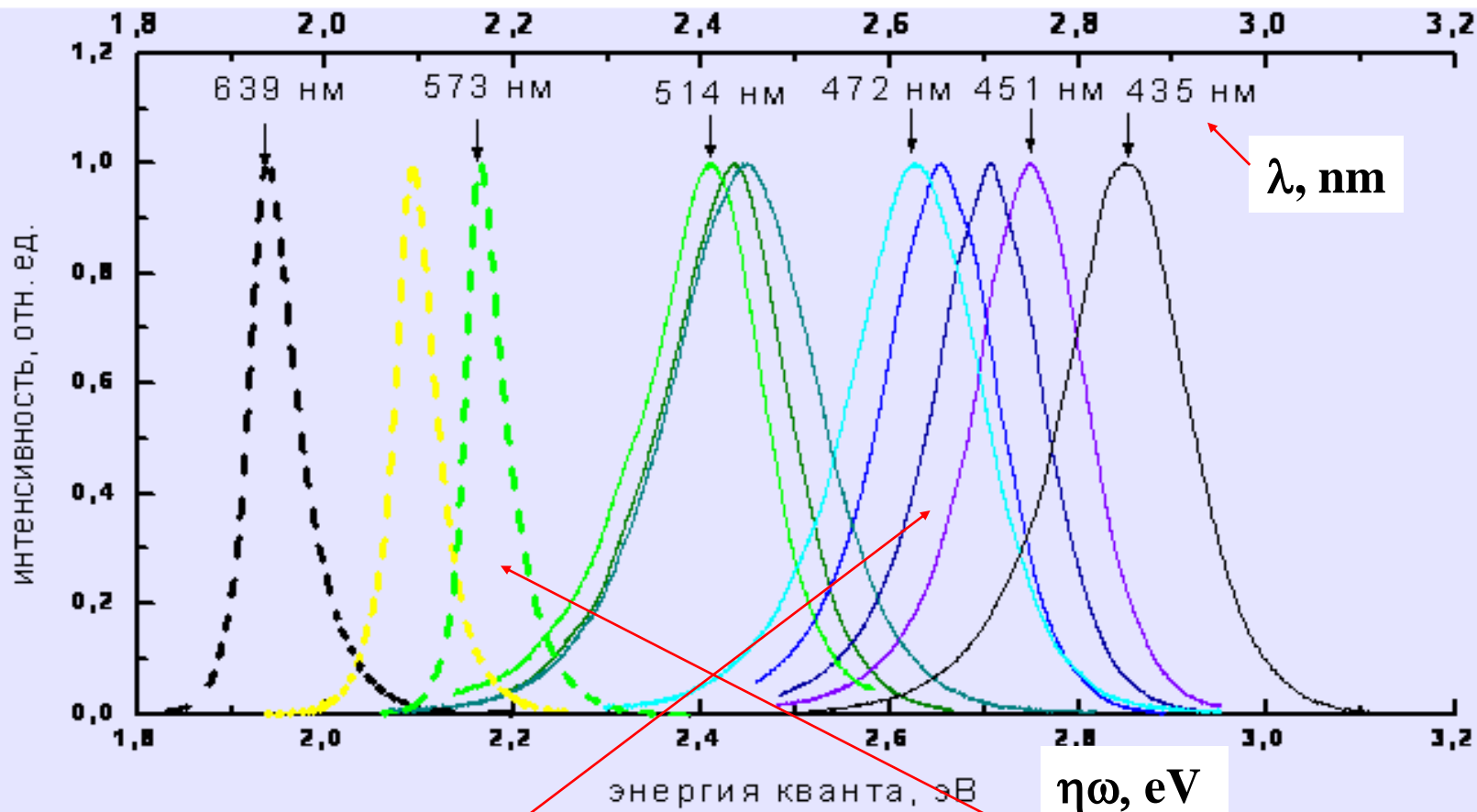
Г.В.Сапарин, С.К.Обыден, И.Ф.Четверикова, М.В.Чукичев. Бюлл. Моск. Ун-та, сер. 3 (Физ. и Астр.), 1983, т. 24, №3, стр. 56-59; v. 38, pp. 66-69 (in English). Г.В.Перловский, С.К.Обыден, Г.В.Сапарин, С.И.Попов. Бюлл. Моск. Ун-та, сер. 3 (Физ. и Астр.), 1984, т. 25, №3, стр. 21-26; 1984 v. 39, pp. 24-29 (in English). Температурная релаксация катодоллюминесценции, активированной электронным пучком в GaN:Zn.



А.Э.Юнович

С начала 1996 года «идейным вдохновителем» работ по светодиодам на основе гетероструктур нитрида галлия и его твердых растворов на физическом факультете МГУ является профессор А.Э.Юнович

Люминесценция эффективных светодиодов на основе соединений $A^{III}B^V$ перекрывает видимый диапазон длин волн.



Спектры СД на основе $InGaN$ (жирные кривые) и $AlInGaP$ (пунктирные) при комнатной T . Сверхъяркие синие, зеленые и УФ СД из гетероструктур $InGaN/AlGaN/GaN$. А.Э.Юнович. *Химия и Жизнь*, 1999, N 5-6, с.46- 48. *Природа*, 2001, N 6, с. 38-46. В сборнике *«Российская наука: Грани творчества на грани веков»*. Изд. «Научный мир», 2000 г., с. 94-99.

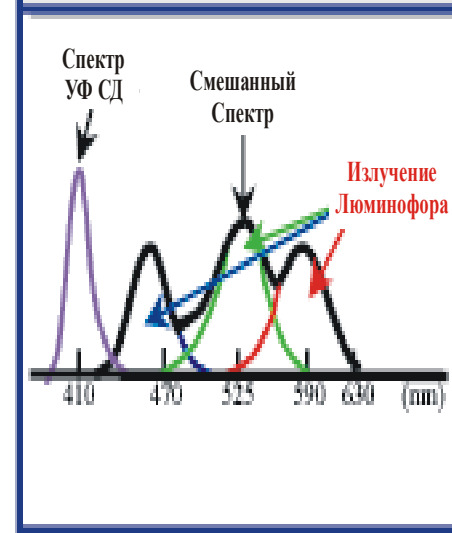
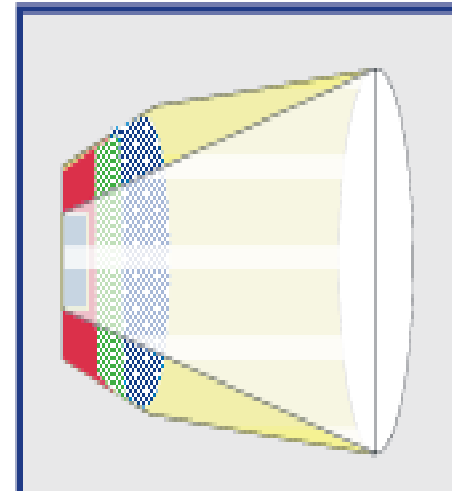
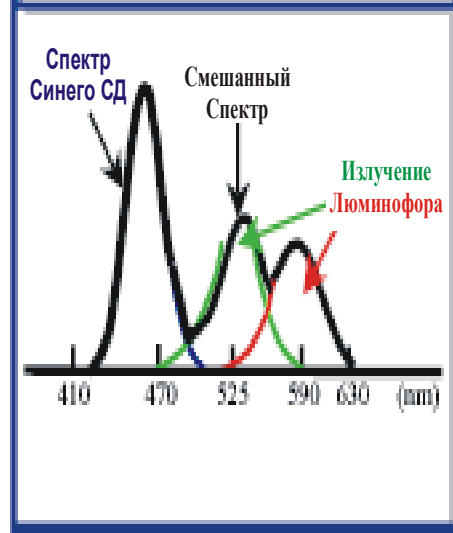
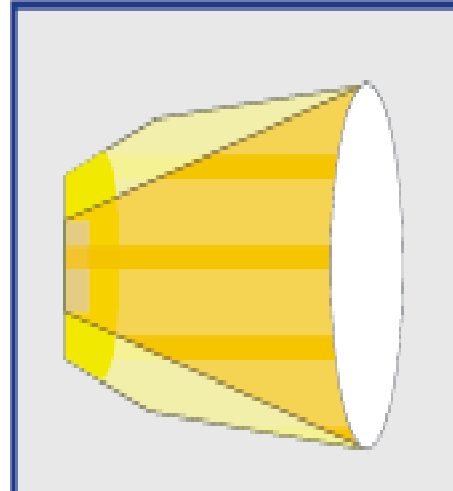
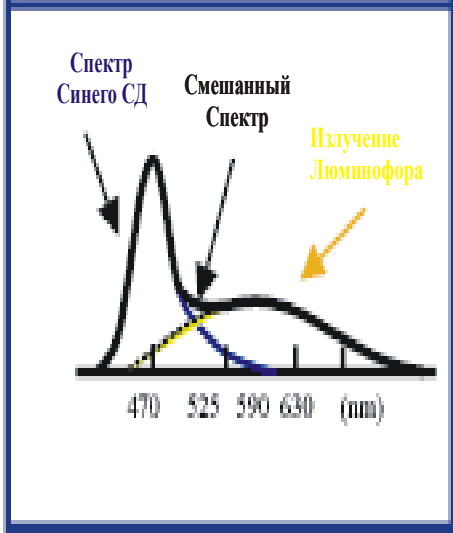
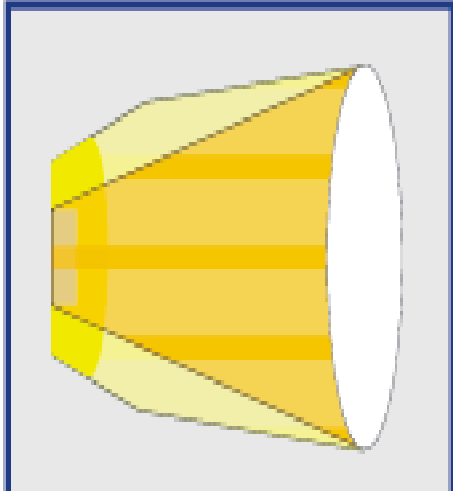
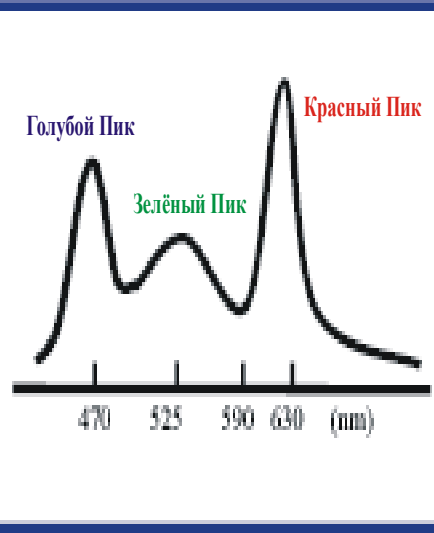
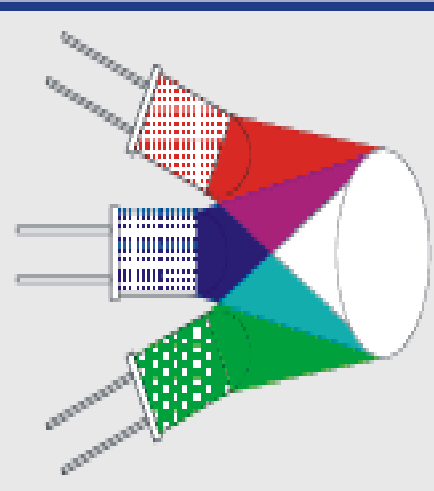
Типы белых светодиодов

Красный+Зелёный+
Голубой СД

Голубой СД+жёлтый
люминофор

Голубой СД+зелёный
и красный люминофор

УФ СД +
RGB люминофор



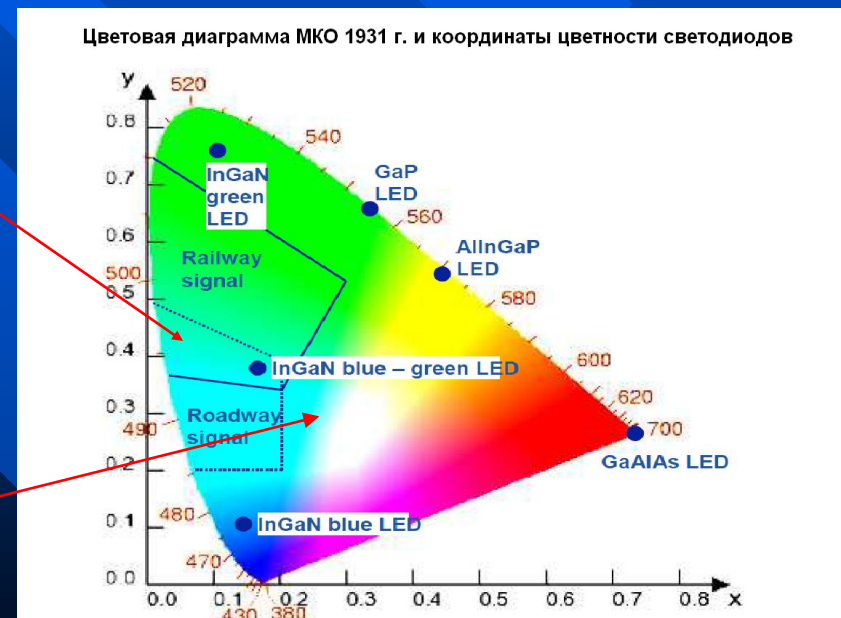
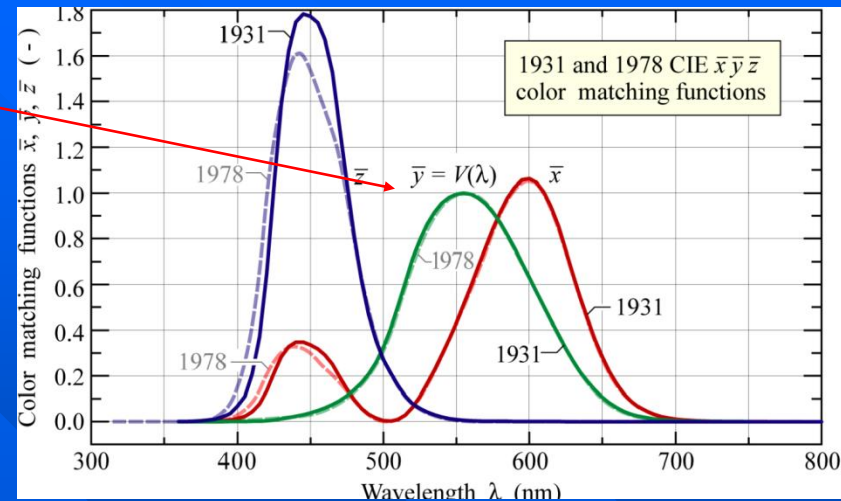
Белые СД. Цветовые характеристики СД

Спектральная чувствительность человеческого зрения $V(\lambda)$ для разных цветов (синего зеленого, красного) должна быть принята во внимание для количественного описания свойств СД. Координаты цветности СД показаны на цветовой диаграмме МКО.

Коррелированная цветовая температура (КЦТ, ССТ) (сравнение со спектром черного тела, кривая Планка). “Теплые, natural и холодные” источники света (КЦТ (ССТ): <3000 К, ~4000 К, ~6000 К). Координаты цветности (x,y) на диаграмме МКО.

Индекс цветопередачи (CRI) – спектры отражения от 8 или 14 стандартных поверхностей для излучения СД в сравнении со стандартным источником света CRI - до 100. Проблема: CRI увеличивается \rightarrow K падает.

**Для освещения нужны
СВЕТОДИОДЫ БЕЛОГО СВЕЧЕНИЯ !**



Эффективность СД

Электрическая эффективность: η_{electr}

Внутренний квантовый выход: $\eta_i =$

= Поток излучательной рекомбинации/Полный поток рекомбинации.

Коэффициент оптического вывода: η_{opt}

Внешний квантовый выход излучения: $\eta_{\text{ext}} = \eta_i \cdot \eta_{\text{opt}}$.

Измерения η_{ext} стандартизованы!

Коэффициент полезного действия $\eta_W = \eta_{\text{electr}} \cdot \eta_i \cdot \eta_{\text{opt}}$

Внешний квантовый выход излучения

СД на основе InGaN/AlGaN/GaN

[H.Amano, IWN-2010, Sept. 2010, N5.1]

Световой поток: F_λ (лм). Световая эффективность (люмен-эквивалент) K :

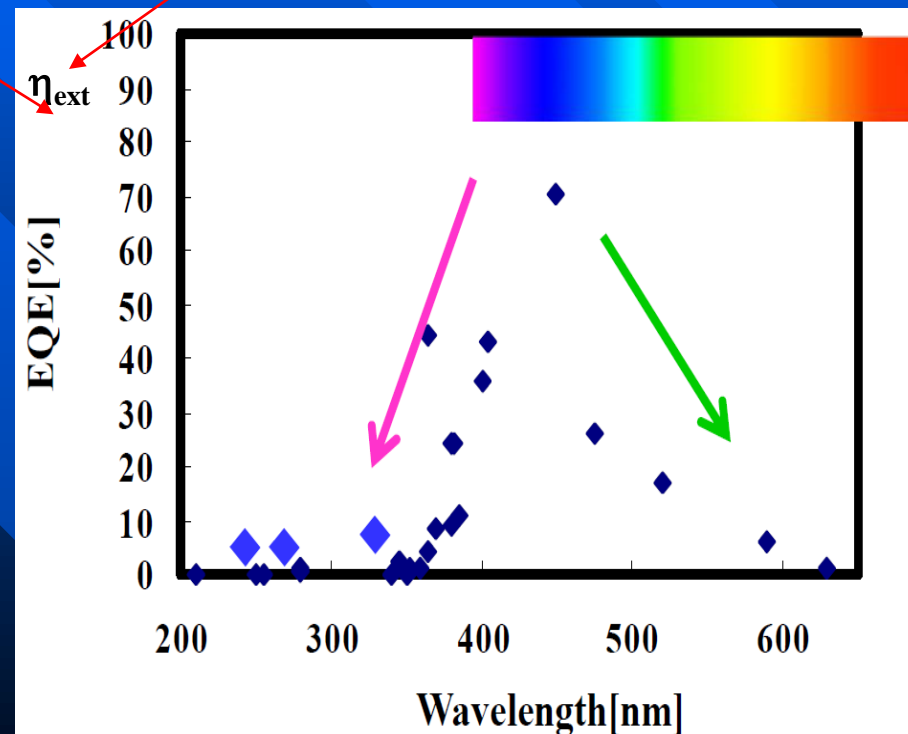
$$K(\text{лм/Вт}) = F_\lambda / P_{\text{opt}} = \\ = 683[\text{лм/Вт}] \cdot \int P(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda / \int P(\lambda) d\lambda$$

Коэф. преобразования люминофора, η_{conv}

Световая отдача η_Φ (лм/Вт) =

$$= F_\lambda / P_{\text{el}} =$$

$$= K \cdot \eta_{\text{electr}} \cdot \eta_i \cdot \eta_{\text{opt}} \cdot \eta_{\text{conv}}$$



Реальные успехи в развитии физики и технологии СД, в их применении в освещении, превзошли предсказания о светодиодном будущем, сделанные на грани веков

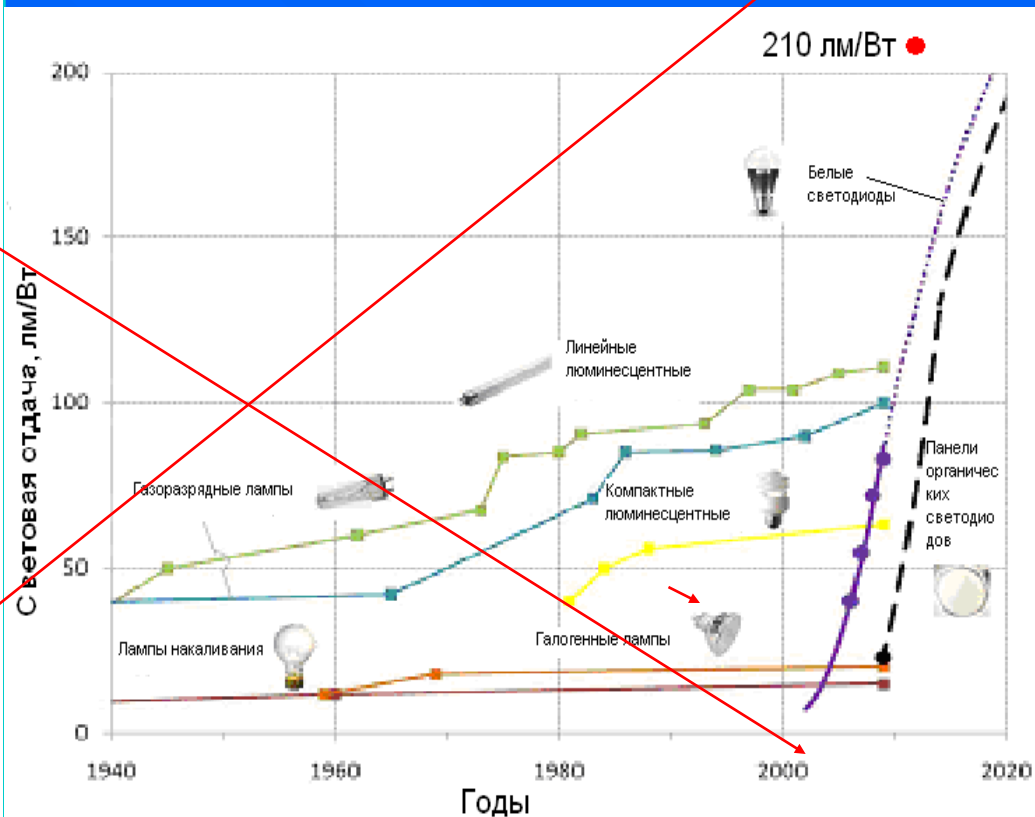
Световая отдача белых СД достигла светоотдачи ламп накаливания (18 лм/Вт) в 2001 г.

Развитие СД после 2000 г. показано от 1940 г. и предсказаниями до 2020 г. Они были превзойдены вдвое в 2011 г.

«Сree» сообщила в марте 2014 г. о световой отдаче белых СД

303 лм/Вт!

Десятки блестящих ученых, сотни тружеников науки и инженеров, тысячи рабочих во всем мире обеспечили этот прогресс.



СВЕТОДИОДЫ как основа будущего освещения

Преимущества СД

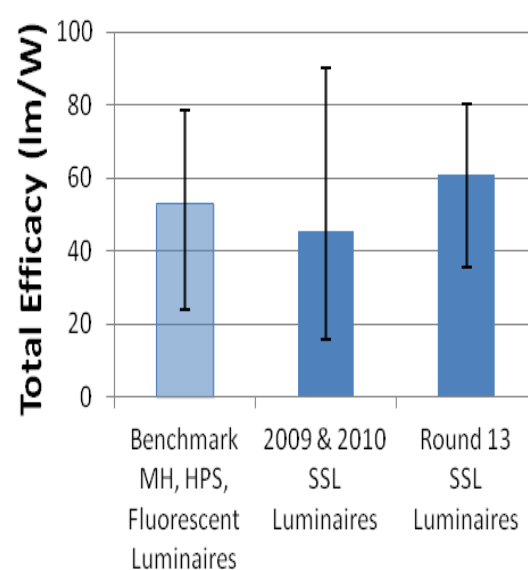
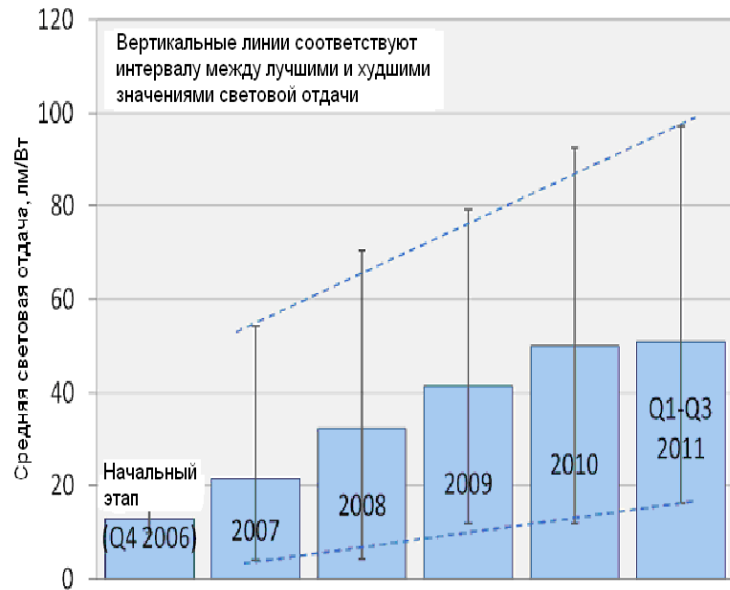
- Рекорд светоотдачи для белых СД **303 lm/W** («Cree», 2014); лучшие коммерческие СД **160-180 lm/W**, массовые промышленные СД - **100-120 lm/W**. (лучшие энергоэффективные люминесцентные лампы – **100-120 lm/W**; лампы накаливания – **18 lm/W**).
- **Время жизни:** световой поток падает на 70% - после 40000 часов при 80°C.
- **Направленное излучение:** выше эффективность ламп.
- **Вибростойкость** – нет нити.
- **Стабильность при низких T:** нет проблем при включении.
- **Безопасность** в пожаро- и взрывоопасных помещениях.
- **Мгновенное включение:** наносекунды.
- **Удаленный контроль** – интеллектуальное освещение.
- **Цвет:** CRI>90, почти естественный индекс цветопередачи.

Промышленные СД в США: светотехнические устройства на основе СД превысили по светоотдаче устройства с традиционными лампами в 2012 г. !

Объем продаж СД в 2012 г. в мире достиг 13,3 млрд. \$.

Применения СД: автомобили, дисплеи и экраны, мобильные устройства, медицина, знаковые индикаторы.

В 2012 г. 26% - ОБЩЕЕ ОСВЕЩЕНИЕ

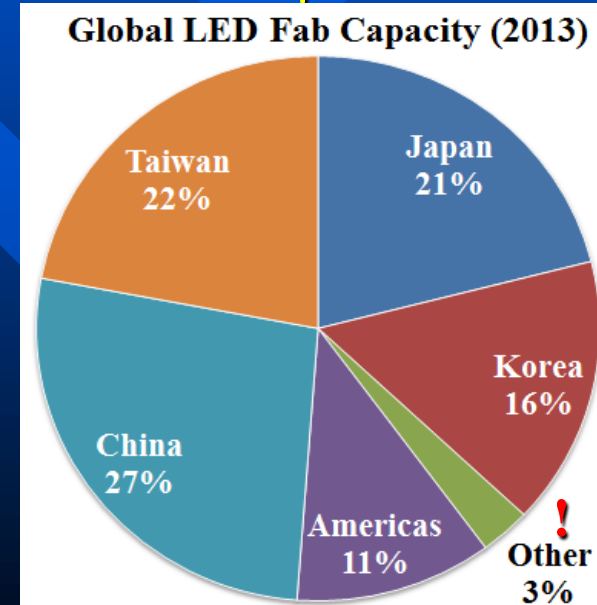


Оценка экономического эффекта в России

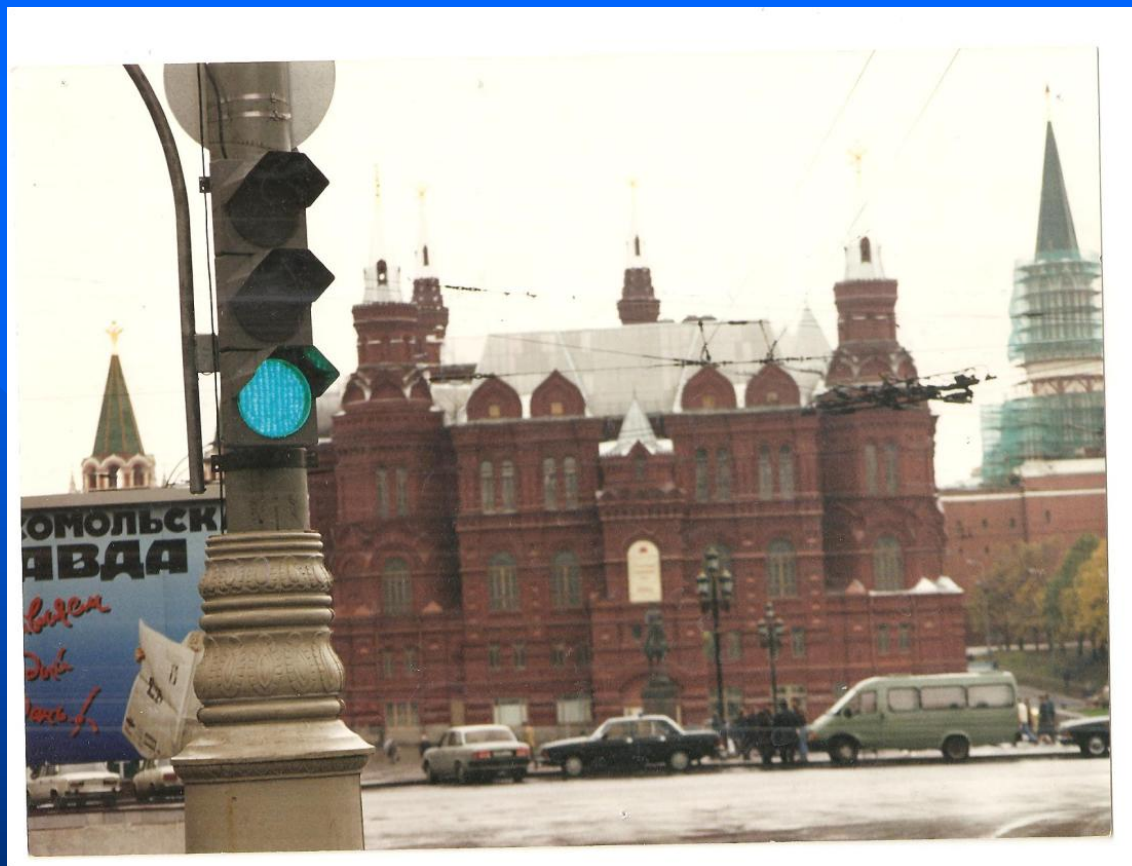
Потребление электроэнергии на освещение в России составляет приблизительно 140 млрд. кВт·час/год,

из них большую часть потребляют лампы накаливания; стоимость электроэнергии составляет 4.5 руб./кВт·час.

Если к 2016-17 гг. лишь половина этой энергии будет сэкономлена за счет применения светодиодов, то это даст экономию более 300 млрд. руб./год.

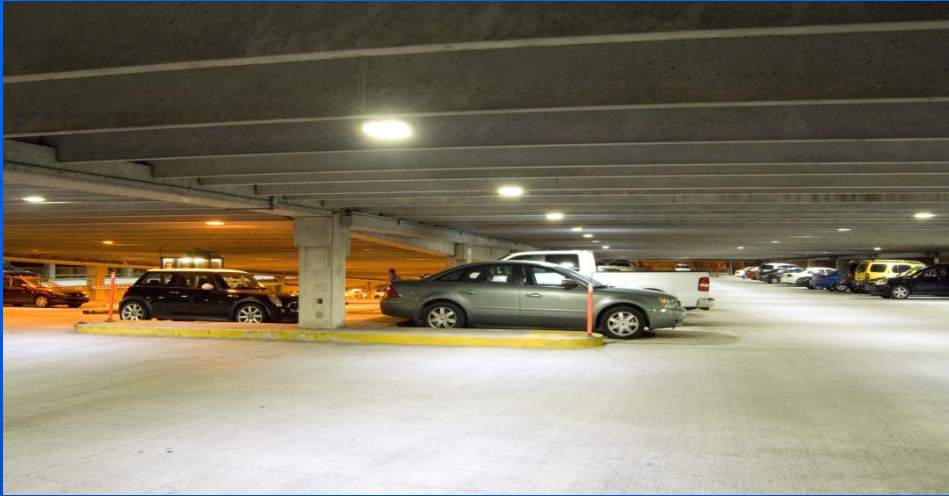


Примеры применения светодиодов



СД светофоры в Москве, фирма «Свеча» (Зеленоград); зеленый – СД из GaN от «Nichia Chemical»; Москва была 1-м городом в мире (1997 г.) с массовым (1000 в Садовом кольце) применением СД светофоров. (Хоз. Дог. N 12/96. Физ. фак-т с Научно-Производственной фирмой «Свеча», 1996-97 гг.)

Примеры применения светодиодов за рубежом



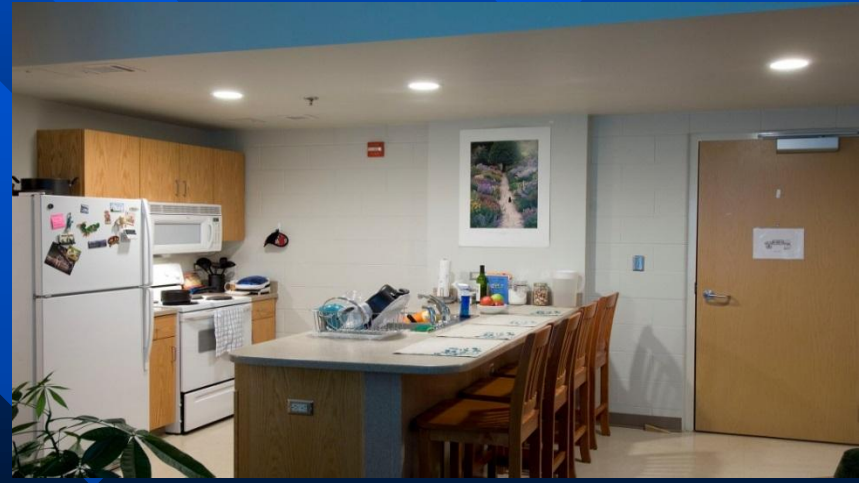
Подземная парковка (Северная Каролина, США)



Автозаправочная станция BP (США)

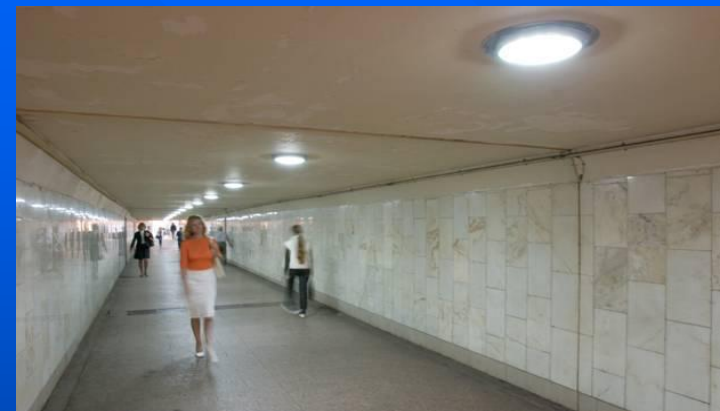


Светодиодные светильники на автостраде (США)



Офисные светильники на светодиодах

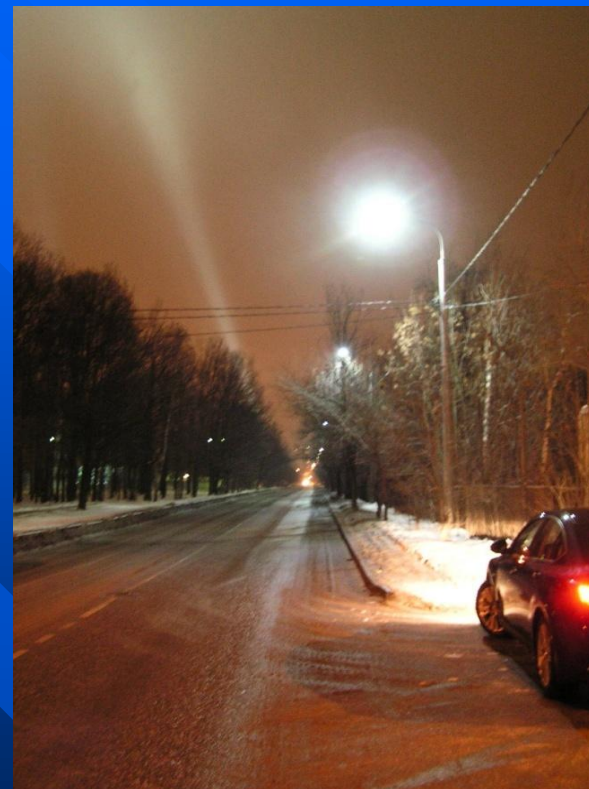
Примеры применения светодиодов в России



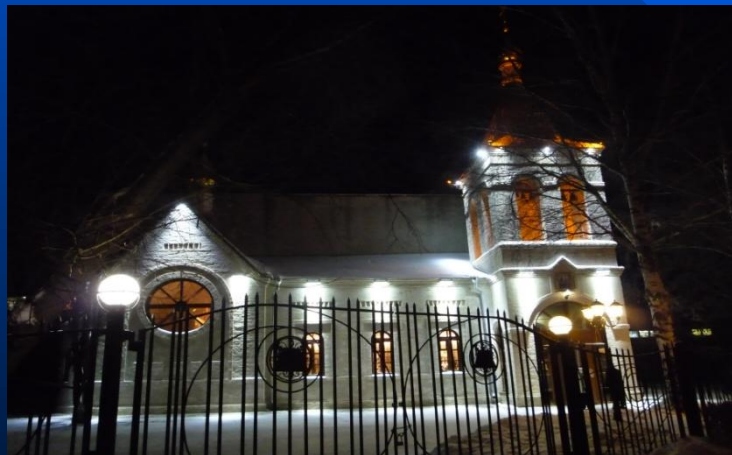
Подземный переход (Москва, м. «Рижская»)



Освещение цеха (Москва, Зеленоград, ОАО «Логика»)

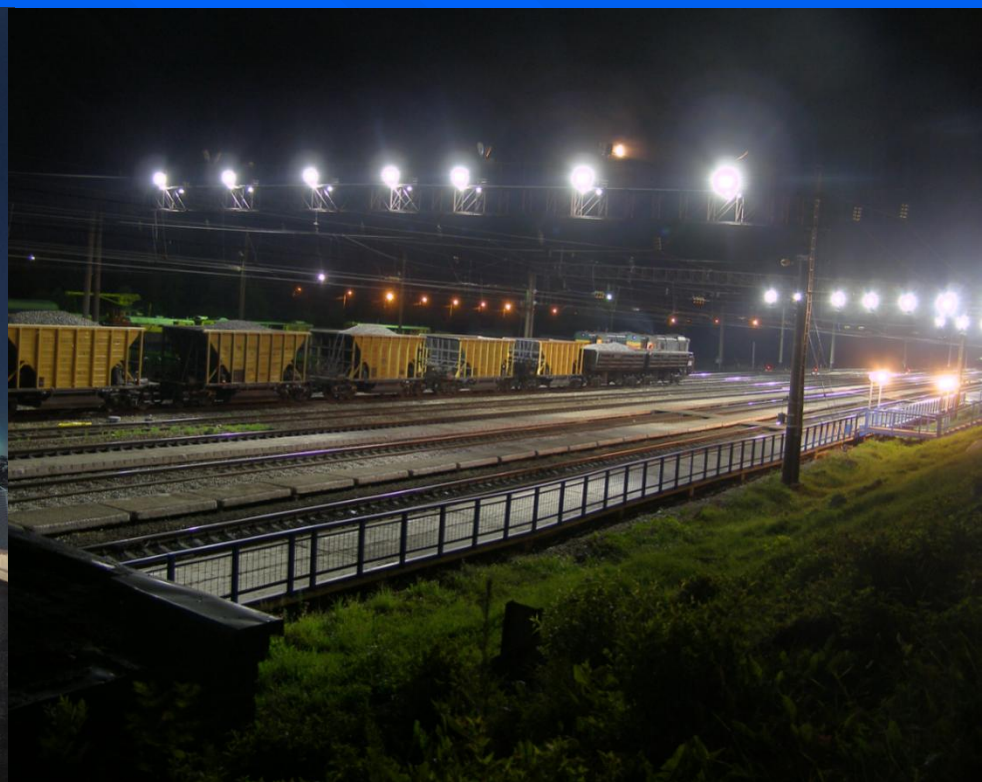


Уличное освещение (Москва, проезд Дубовой Рожи)



Освещение здания церкви (Владимир)

Проекты и программы светодиодного освещения

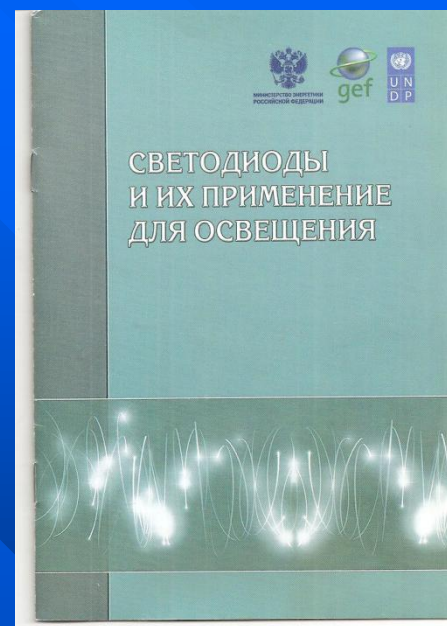
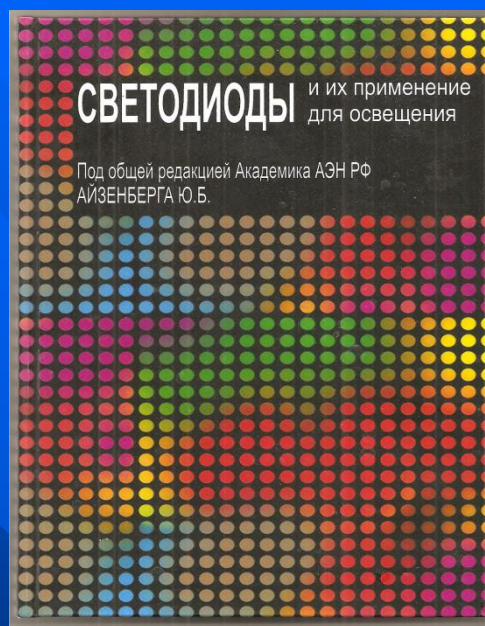
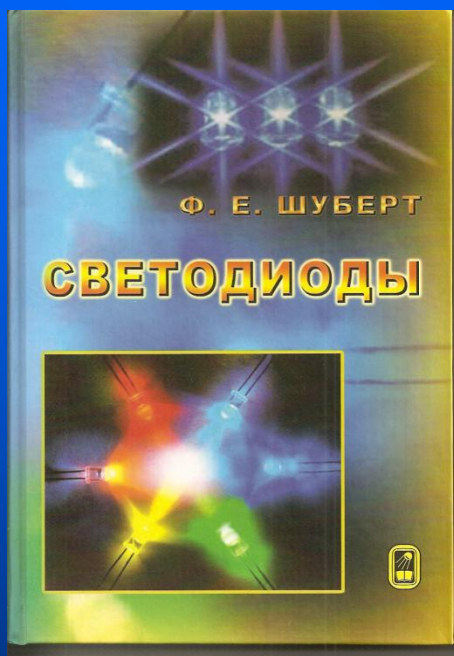


Уличные светодиодные светильники, проект LED City (США)

Ригельное освещение светодиодными светильниками станции Шексна, проект РЖД (Россия)

Проекты реализованы в рамках целевых программ по энергосбережению администрации штата Северная Каролина (США) и ОАО РЖД (Россия)

Издание учебной, научной и научно-популярной литературы по светодиодам.



Ф.Е.ШУБЕРТ. СВЕТОДИОДЫ (пер. с англ. под ред. А.Э.Юновича), Физматлит, 2008, 495с.

СВЕТОДИОДЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ (под ред. Ю.Б.Айзенберга),

Авторы глав: А.Э.Юнович, А.Н.Туркин, М.Л.Бадгутдинов, С.С.Широков. М., «Знак», 2012, 280 с.

А.Э.ЮНОВИЧ. СВЕТОДИОДЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ. М.,«Знак»,2011,16 с.

За 18 лет - более 70 статей и более 100 тезисов докладов

во Всероссийских и Международных журналах и конференциях.

Всероссийские Конференции

ФТИ им. А.Ф.Иоффе и Физический факультет МГУ, начиная с 1997 г., поочередно в Москве и С.-Петербурге, провели 4 Совещания и 9 Всероссийских Конференций «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы», на которых были организованы светодиодные форумы.

Решения Конференций и Форумов направлялись в Правительство РФ, в профильные Министерства, в Гос. Корпорации с предложениями о развитии светодиодной промышленности и светодиодного освещения.

<http://nitrides-conf.ioffe.ru/>

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!