

На правах рукописи

Феопёнтов Анатолий Валерьевич

**ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ В ЭФФЕКТИВНЫХ
СВЕТОДИОДАХ БЕЛОГО ЦВЕТА ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель –
доктор физико-математических наук, профессор Соломонов Александр Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Каргин Николай Иванович, начальник управления развития перспективных исследований (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»);

кандидат технических наук, доцент Мезенов Аделин Валентинович, доцент кафедры квантовой электроники и оптико-электронных приборов (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»).

Ведущая организация – Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе РАН

Защита состоится «___» _____ 20 ____ г. в ____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.04 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ.

Автореферат разослан “___” _____ 20 ____ г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских и
кандидатских диссертаций
Д 212.238.04

д.ф.-м.н. Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Актуальность рассматриваемой тематики в настоящее время обусловлена все возрастающим интересом к светодиодам белого цвета излучения (далее – белые светодиоды), который, в свою очередь, основывается на известных перспективах применения подобных светодиодов в ходе дальнейшего усовершенствования источников света, используемых для целей общего освещения. В настоящее время в прикладной светотехнике происходит вытеснение старых, малоэффективных источников света, таких как лампы накаливания, новыми устройствами, например, компактными люминесцентными лампами. Однако, и у таких ламп имеется ограничение по максимально возможной световой отдаче. И уже в качестве наиболее энергетически эффективных устройств для применения в освещении рассматриваются белые светодиоды.

Собственно высокоэффективные белые светодиоды появились сравнительно недавно, уже после 2000 года. В процессе развития светодиодов белого цвета излучения стало ясно, что наиболее перспективными для массового производства и применения в общем освещении являются те варианты их конструктивного исполнения, в которых основу светодиода составляет полупроводниковый чип, излучающий в синей области спектра. Излучение такого чипа обеспечивается процессами рекомбинации носителей заряда в квантовых ямах, существование которых обусловлено строением гетероструктуры, сформированной на основе твердых растворов системы Ga-In-Al-N. Физика явлений, обуславливающих и сопровождающих излучение гетероструктуры, сейчас изучается достаточно подробно различными коллективами на базе ведущих научных центров мира. Достигнуто понимание основных процессов, хотя многие принципиальные вопросы еще предстоит решить. В частности, одна из наиболее острых проблем состоит в устранении эффекта понижения внешней квантовой эффективности излучения чипа с ростом тока.

На фоне активности в изучении проблем излучательной рекомбинации гетероструктуры вопросы, связанные с преобразованием уже излученной энергии в светодиоде остаются несколько в стороне. Между тем, именно

взаимодействие энергии, излученной полупроводниковым чипом с другими компонентами белого светодиода и, в первую очередь, с люминофором, определяет конечные характеристики изделия. В этом ключе основное внимание привлекают процессы, связанные с преобразованием энергии синего излучения чипа в излучение люминофора. Данное превращение осуществляется с помощью неорганических порошковых или спеченных люминофорных преобразователей. Эти преобразователи представляют собой кристаллические фотолюминофоры, матрицы которых выбираются из классов соединений, обладающих достаточной устойчивостью к внешним воздействиям и стабильностью в условиях работы светодиода. Наиболее распространено применение в качестве таких люминофоров твердых растворов на основе гранатов, силикатов, оксинитридов.

Хотя свойства самих люминофоров изучаются достаточно подробно, следует отметить, что эффективность преобразования в белом светодиоде определяется не характеристиками люминофора как отдельно взятого поликристаллического материала, а характеристиками люминофора в сочетании с тем, в каком виде он находится в светодиоде. Иначе говоря, эффективность белого светодиода напрямую зависит от характеристик фотолюминесцентного преобразователя (люминофорного слоя), представляющего собой отвержденную люминофорную смесь из собственно люминофора и некоторой связки, в качестве которой чаще всего используется стабильный аморфный компаунд. Процессы превращения энергии в люминофорном слое и вывода преобразованной энергии из светодиода на сегодняшний день исследованы недостаточно. И, самое главное, для оценки эффективности преобразования энергии излучения необходима разработка модели, устанавливающей закономерности взаимосвязи параметров чипа, люминофора и люминофорного слоя с характеристиками светодиода, в том числе с эффективностью.

Тема работы, посвященной построению подобной модели и внедрению полученных результатов в производство белых светодиодов, является актуальной и представляет практический интерес для улучшения рабочих характеристик этих приборов.

Объектом исследования настоящей работы являются фотолюминесцентные преобразователи в светодиодах белого цвета излучения.

Целью работы является улучшение параметров фотолюминесцентного преобразователя (люминофорного слоя) в белом светодиоде на основе разработанной модели расчета эффективности преобразования энергии излучения.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. разработана методика определения общей эффективности люминофора;
2. разработана модель расчета эффективности преобразования энергии излучения в светодиоде;
3. исследованы теоретические и экспериментальные закономерности изменения эффективности преобразования;
4. проведена оптимизация параметров белого светодиода.

Научная новизна работы: состоит в том, что в ней впервые проведены комплексные исследования закономерностей изменения эффективности преобразования энергии излучения в белом светодиоде:

- установлена взаимосвязь характеристик чипа и люминофора с эффективностью белого светодиода;
- свойства чипа, люминофора и светодиода, а также параметры эффективности люминофора и светодиода сведены в единую систему;
- исследованы зависимости теоретической и экспериментальной эффективностей преобразования, выраженных в энергетических и световых единицах, от цветности излучения светодиода;
- изучена связь потерь энергии излучения с концентрацией люминофора;
- показано, что если теоретическая эффективность преобразования определяется физическими характеристиками, то экспериментальная эффективность в значительной степени зависит от конструктивного фактора.

Практическую ценность работы определяет разработка методики оценки эффективности конструктивного исполнения белого светодиода и методики улучшения параметров белого светодиода. Практический интерес представляют изученные зависимости эффективности от технических характеристик компонентов светодиода. Проведенная оптимизация параметров мощного белого светодиода позволяет достичь максимального значения светового потока для приемлемых показателей цветности излучения.

Применение светодиода с оптимальными параметрами в системах общего освещения повышает их энергоэкономичность и улучшает эксплуатационные качества.

На защиту выносятся следующие научные положения:

- параметр, определенный как произведение квантовой эффективности люминофора, коэффициента отражения и стоксовского сдвига, достаточен для определения эффективности люминофора в светодиоде;
- предельная эффективность преобразования энергии излучения в белом светодиоде определяется только цветностью излучения и найденным параметром эффективности люминофора;
- отклонение экспериментальной эффективности преобразования энергии излучения от предельной определяется в основном процессом перехода энергии желтого излучения в тепловую в результате взаимодействия этого излучения с частицами люминофора.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- на всероссийских конференциях "Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы", Москва, 2007 г., Санкт-Петербург, 2008 г., Москва, 2010 г.;
- на 9-й российской конференции по физике полупроводников, Новосибирск, Томск, 2009 г.;
- на конференциях профессорско - преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 2010-2011 гг..

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, из них – 4 статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК, 6 работ - в материалах и трудах международных научных конференций и симпозиумов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 82 наименования. Основная часть работы изложена на 120 страницах машинописного текста. Работа содержит 23 рисунка и 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, определены цель и задачи диссертации. Сформулирована научная новизна, практическая значимость полученных в работе результатов и научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы, в котором проведен анализ современного состояния разработки, исследования и технологии изготовления белых светодиодов. Рассмотрены существующие подходы к их исполнению. Изложены основные принципы конструирования мощных светодиодов. Представлены требуемые параметры разрабатываемого белого светодиода. Приведены результаты исследований методов оценки эффективности белых светодиодов.

Показано, что наиболее актуальным для применения в ближайшем будущем в целях построения систем освещения является вариант исполнения белого светодиода, основанный на использовании синего чипа в качестве источника возбуждения люминофора, излучающего в желтой области спектра. Выявлено, что существует возможность задать граничные условия оптимизации параметров светодиода, результатом которой должно быть достижение заданных целевых значений наиболее важных световых и цветовых характеристик. Отмечено, что имеющиеся методики характеризуются несколькими принципиальными недостатками, не позволяющими применять получаемые результаты в массовом производстве.

На основании проведенного анализа литературы сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе описана методика проводимых исследований. В ходе работы с использованием современного оборудования, с применением как оригинальных разработанных, так и усовершенствованных классических методов, исследовались спектральные характеристики и гранулометрический состав люминофоров, оптические и электрические параметры светодиодов.

Спектральные характеристики люминофоров измерялись по схеме отражения от плоского слоя условно бесконечной толщины. Измерительная установка в основном состояла из лампы (источника возбуждающего излучения), держателя для образцов, размещаемого между двумя монохроматорами, и фотоприемника. При изучении оптических свойств светодиодов измеряемой величиной был спектр излучения светодиода, а все

остальные величины рассчитывались, исходя из него. Измерения спектра излучения проводились с использованием установки SLMS-0400 Series Spectral Lamp Measurement System производства компании Labsphere. В ходе работы измерялись постоянное прямое напряжение и постоянный прямой ток светодиодов. Потребляемая электрическая мощность находилась как произведение этих величин. Гранулометрический состав использованных в работе люминофоров, а также некоторые размерные характеристики чипов и люминофорных слоев, были изучены методом оптической микроскопии при наблюдении исследуемых образцов в отраженном свете, по спектральному составу приближенном к дневному свету.

В третьей главе представлены результаты исследования принципиальных закономерностей изменения эффективности преобразования энергии излучения фотолюминесцентным преобразователем (люминофорным слоем) в белом светодиоде.

Изучена зависимость оптимума светового потока (наиболее важной характеристики белого светодиода) от энергетической и световой эффективности. Световой поток можно определить как произведение оптической мощности (мощности излучения) на световую эффективность. Для оценки эффективности преобразования были введены следующие величины:

- отношение мощностей излучения белого светодиода с нанесенным люминофорным слоем и исходного синего светодиода P_W/P ;
- отношение мощностей излучения белого светодиода с линзой и белого светодиода с нанесенным люминофорным слоем P_{WL}/P_W ;
- отношение мощностей излучения белого светодиода с линзой и исходного синего светодиода P_{WL}/P .

Из них наиболее информативным является последний параметр – P_{WL}/P , поскольку включает в себя коэффициенты P_W/P и P_{WL}/P_W .

Оптическая мощность белого светодиода увеличивается по мере преобладания в спектре излучения синей составляющей. Аналогично при продвижении к синей области увеличиваются коэффициенты P_W/P и P_{WL}/P (рис. 1). Здесь и далее под координатами цветности излучения светодиода понимаются координаты, определенные в системе МКО (Международная Комиссия по Освещению) в 1931 году. Коэффициент P_{WL}/P_W также зависит от спектра излучения. Это связано с разной эффективностью работы линзы по отношению к желтому и синему излучениям, характеризующимся разной пространственной направленностью.

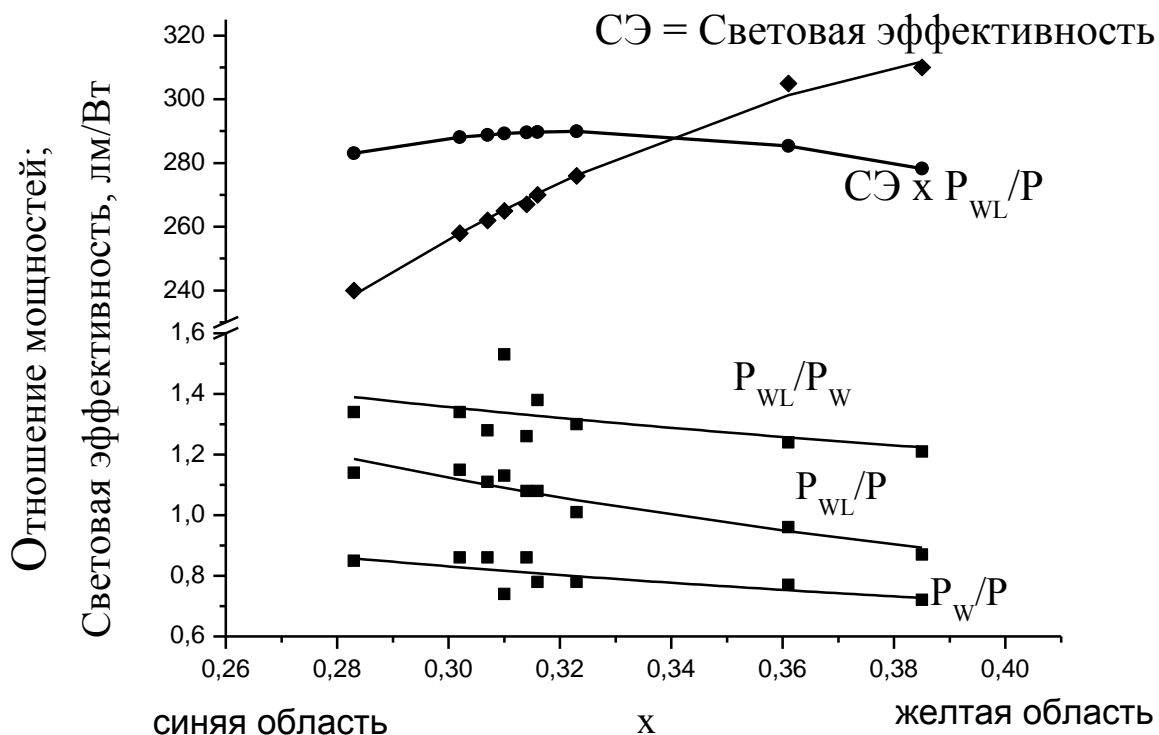


Рисунок 1 – Экспериментальная зависимость, показывающая положение максимума светового потока, а также зависимости световой эффективности и коэффициентов эффективности от спектра излучения белого светодиода

Световая эффективность отражает интегральную чувствительность глаза к исследуемому спектру и возрастает при сдвиге спектра к желтой области. Световой поток F зависит как от оптической мощности, так и от световой эффективности СЭ:

$$F = CЭ \times P \times (P_{WL}/P), \quad (1)$$

В области белого цвета зависимость светового потока от координаты цветности x может иметь максимум, поскольку определяется как произведение двух непрерывных монотонных функций с положительным и отрицательным наклоном. Положение максимума показывает, какие координаты цветности оптимальны для данного светодиода. Поскольку для разных конструктивных исполнений люминофорного слоя наклон зависимости коэффициента P_{WL}/P различается, то отличается и зависимость светового потока от цвета излучения. То есть, каждый вариант люминесцентного преобразователя характеризуется

своим положением максимума светового потока.

Исследовано влияние концентрации люминофора в люминофорном слое на эффективность преобразования излучения. Концентрация является наиболее значимым конструктивным фактором в технологии белых светодиодов, определяющим цветность излучения. Конструкция белого светодиода, на основе которого проводились все основные эксперименты работы, представлена на рис. 2. Основные результаты, иллюстрирующие влияние концентрации на эффективность преобразования энергии излучения представлены в таблице 1.

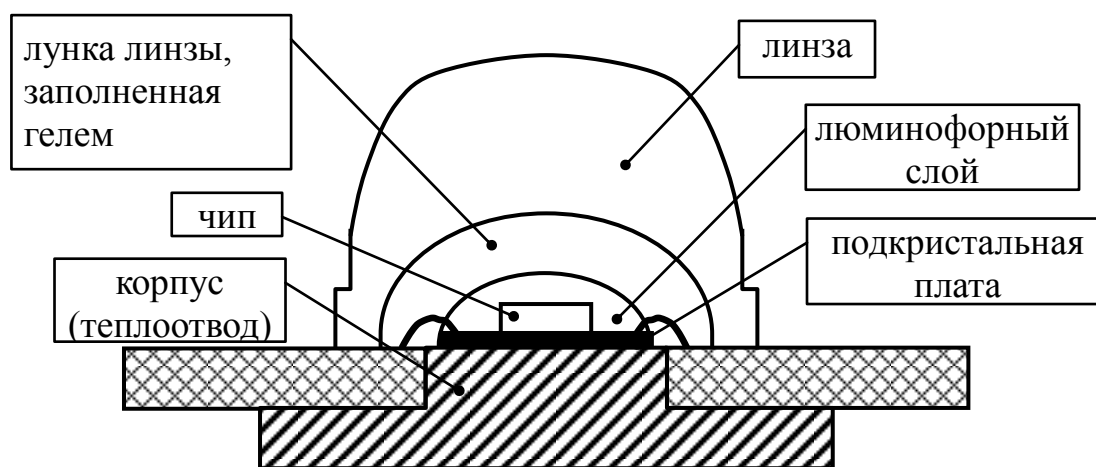


Рисунок 2 – Конструкция белого светодиода ИРС-50 (SvL-05) с люминесцентным преобразователем (люминофорным слоем)

Таблица 1 – результаты нанесения с разной концентрацией люминофора

Концентрация люминофора, масс. %	Коррелированная цветовая температура, К	Коэффициент P_{WL}/P
15	4000	0,69
10		0,91
8		0,97
6		1,06

Как показали дополнительные наблюдения, эффективность преобразования излучения повышается с уменьшением концентрации из-за увеличения доли эффективно преобразующего излучение люминофора в люминофорном слое.

Были проведены исследования и других конструктивных факторов на эффективность преобразования. Показано, что эффективность возрастает при: увеличении отражательной способности поверхности элемента конструкции, несущего люминофорный слой, уменьшении степени шероховатости

поверхности светодиодного чипа, упорядочивании (с одновременным уплотнением) люминофорного слоя.

Важнейшие результаты исследований этой части работы состоят в том, что зависимость светового потока от цветности излучения в области белого цвета может иметь максимум, каждый вариант люминофорного слоя характеризуется своим положением максимума, а эффективность преобразования излучения зависит от конструктивных факторов, влияющих на процесс перехода энергии излучения в тепловую.

Четвертая глава посвящена разработке методики определения общей эффективности люминофора и модели расчета эффективности преобразования энергии излучения в светодиоде.

Мощность излучения белого светодиода P_{WL} (рис. 3) можно представить как сумму двух составляющих – мощности синего излучения P_1 , выходящего из светодиода без контакта с частицами люминофора, и мощности желтого излучения P_2 . Желтое излучение представляет собой результат преобразования части синего излучения с мощностью P_3 , попадающего на поверхность частиц люминофора.

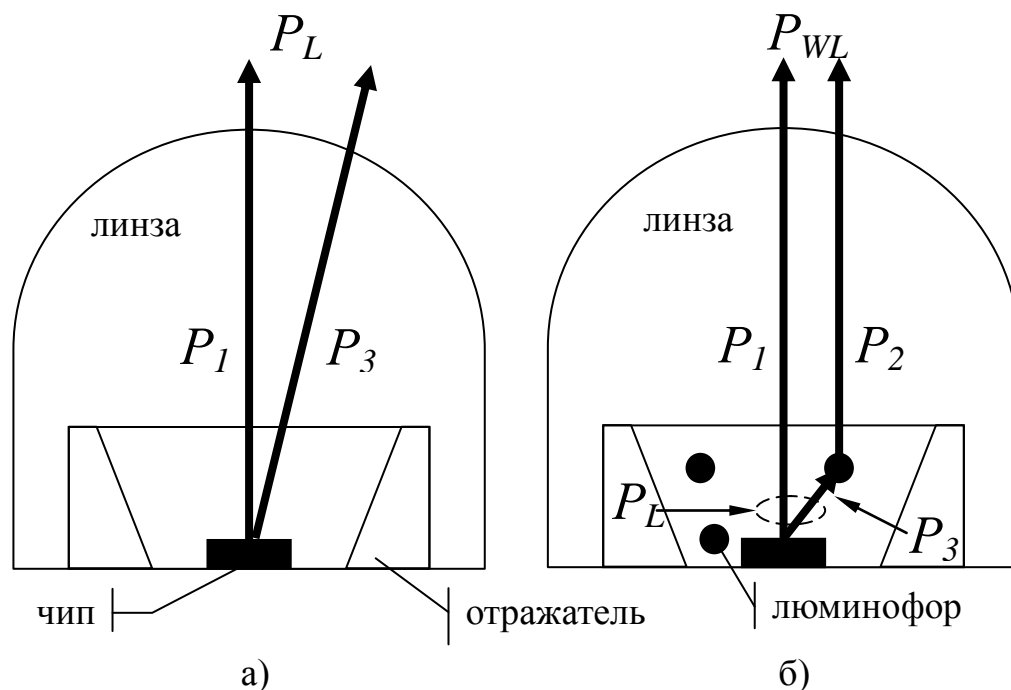


Рисунок 3 – Схема представления мощности излучения синего (а) и белого (б) светодиодов в виде составляющих

Расчет теоретической или предельной эффективности преобразования предполагает допущения, заключающиеся в том, что: из синего и белого

светодиодов все излучение выводится без потерь, а отраженное люминофором излучение рассеивается в виде тепла. Основываясь на предлагаемой схеме представления энергии излучения в виде составляющих, теоретическая эффективность преобразования может быть выражена в следующем виде:

$$\mathcal{G} = \frac{P_{WL}}{P_L} = \frac{P_1 + P_2}{P_1 + P_3} = \frac{1 + \frac{P_2}{P_1}}{1 + \frac{P_3}{P_1}}. \quad (2)$$

Обозначим отношение желтой и синей составляющей (P_2/P_1) в энергетическом спектре излучения белого светодиода как S . Это отношение однозначно соответствует цвету излучения светодиода. Общий параметр эффективности люминофора обозначим как ξ и определим как отношение мощности желтого излучения, выходящего из светодиода, и мощности синего излучения, попадающего на поверхность частиц люминофора (P_2/P_3).

Рассмотрим преобразование энергии синего излучения люминофором. На рис. 4 представлена схема этого преобразования.

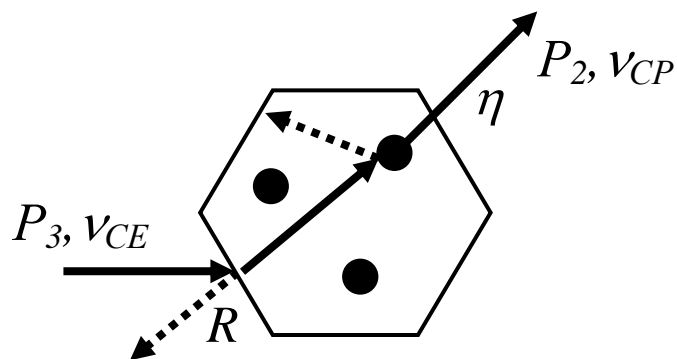


Рисунок 4 – Схема преобразования энергии синего излучения, попадающего на поверхность частиц люминофора

Первые потери энергии обусловлены неполным поглощением возбуждающего (синего) излучения люминофором. Они характеризуются коэффициентом отражения R . В дальнейшем потери энергии имеют место при безызлучательном рассеянии в структуре люминофора. Они характеризуются квантовой эффективностью η . И, наконец, потери за счет стоксовского сдвига характеризуются отношением эффективных частот излучения люминофора ν_{CP}

и излучения чипа ν_{CE} (здесь и далее под эффективной понимается частота, соответствующая положению центра тяжести спектра). Или, в упрощенном виде, отношением эффективных длин волн излучения чипа λ_{CE} и излучения люминофора λ_{CP} .

Таким образом, общий параметр эффективности ξ учитывает квантовую эффективность люминофора, эффективность поглощения и стоксовский сдвиг:

$$\xi = \eta(1-R) \frac{\nu_{CP}}{\nu_{CE}} \cong \eta(1-R) \frac{\lambda_{CE}}{\lambda_{CP}}. \quad (3)$$

Наиболее точно параметр ξ может быть определен в интегральной форме:

$$\xi = \left(\frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} (1-R(\nu)) \varphi_E(\nu) d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \varphi_E(\nu) d\nu} \right) \left(\frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \eta(\nu) \varphi_E(\nu) d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \varphi_E(\nu) d\nu} \right) \frac{\nu_{CP}}{\nu_{CE}}, \quad (4)$$

где: ν – частота излучения; R – спектральный коэффициент отражения люминофора; φ_E – спектральная плотность потока излучения чипа; $\nu_1 \dots \nu_2$ – диапазон частот излучения чипа; η – спектральная квантовая эффективность люминофора.

После преобразований получаем окончательное выражение для определения теоретической эффективности преобразования энергии излучения:

$$\mathcal{G} = \frac{\xi + C\xi}{\xi + C} = \frac{1 + C}{1 + \frac{C}{\xi}}. \quad (5)$$

Найденная закономерность описывает эффективность преобразования для такого белого светодиода, в котором отсутствуют дополнительные по сравнению с синим светодиодом потери энергии, кроме тех, что связаны с рассеянием синего излучения люминофором, безызлучательным рассеянием энергии в самом люминофоре и стоксовским сдвигом. В реальных условиях наблюдаются отклонения от максимальной эффективности преобразования в меньшую сторону.

Таким образом, был найден общий параметр эффективности люминофора, учитывающий все необходимые характеристики и позволяющий рассчитать предельную эффективность преобразования излучения. Полученное в итоге выражение позволяет, как показали дальнейшие эксперименты, определять с необходимой для использования в производстве светодиодов точностью предельную эффективность преобразования, благодаря включению в расчет параметра, соответствующего цвету излучения.

В пятой главе продемонстрировано применение созданной модели преобразования энергии излучения в процессе оптимизации параметров выпускаемых белых светодиодов.

При этом были исследованы зависимости теоретической и экспериментальной эффективностей преобразования от цвета излучения и влияние на них концентрации люминофора. Результаты исследования представлены на рис. 5. Здесь и далее для построения зависимостей от цвета излучения в качестве аргумента используется параметр C , однозначно соответствующий цвету излучения светодиода.

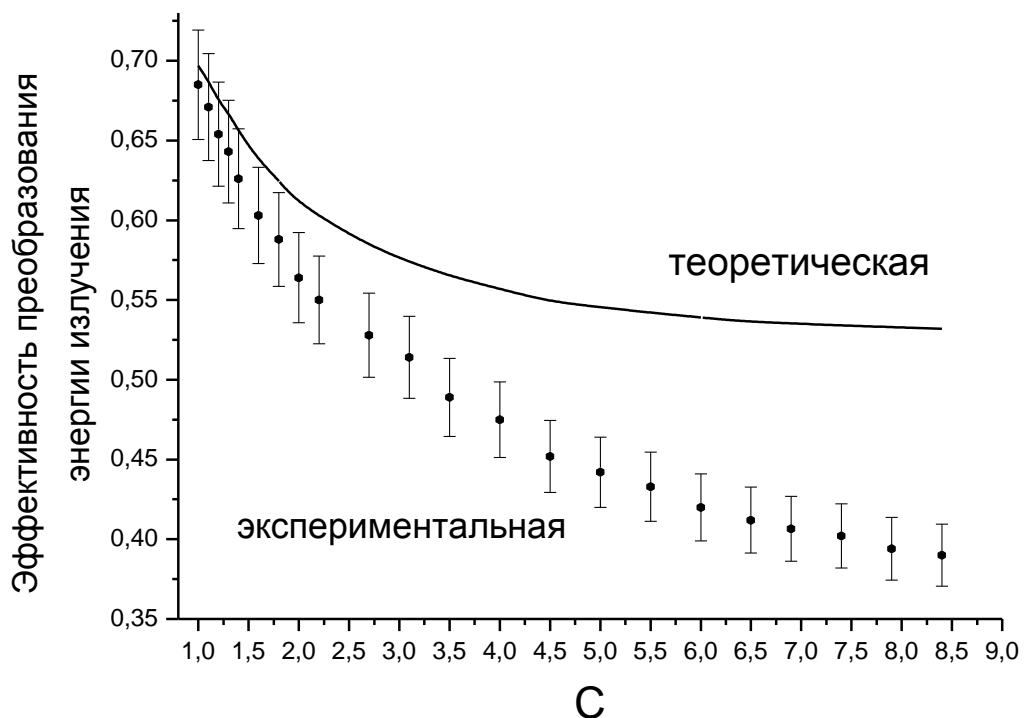


Рисунок 5 – Зависимости теоретической и экспериментальной эффективности преобразования от цвета излучения

Увеличение теоретической и экспериментальной эффективностей при

сдвиге цвета излучения к синей области (уменьшении параметра C), как и в предыдущих исследованиях, обусловлено уменьшением доли преобразованного люминофором излучения и, соответственно, снижением потерь энергии при этом преобразовании.

Отклонение экспериментальной эффективности от предельной обусловлено рассеиванием люминофором в виде тепла энергии желтого излучения, поскольку рассеяние синего излучения уже учтено в расчетной модели. При этом, что закономерно, разница между теоретической и экспериментальной эффективностями увеличивается при повышении концентрации, то есть, при возрастании влияния конструктивного фактора.

Были построены зависимости теоретической и экспериментальной эффективностей преобразования, выраженных в световых единицах, от цвета излучения. Чтобы перейти от энергетической эффективности к эффективности преобразования, выраженной в световых единицах (здесь и далее обозначенной, как ЭПСЕ), произведем следующие действия:

$$F = CЭ \times P \times (P_{WL}/P), F = CЭ \times P_{WL}, F/P_L [\text{лм/Вт}] = CЭ \times (P_{WL}/P_L). \quad (6)$$

Так, экспериментальная ЭПСЕ (F/P_L) может быть определена как произведение экспериментальной энергетической эффективности преобразования P_{WL}/P_L и световой эффективности $CЭ$. При условии, что потери энергии излучения минимальны, получаем выражение для расчета теоретической или предельной ЭПСЕ:

$$P_{WL}/P_L \rightarrow \mathcal{E}, F/P_L \rightarrow \mathcal{E}_F, \mathcal{E}_F [\text{лм/Вт}] = CЭ \times \mathcal{E}. \quad (7)$$

Отсюда, теоретическая ЭПСЕ (\mathcal{E}_F) равна произведению теоретической эффективности преобразования \mathcal{E} и световой эффективности $CЭ$.

Зависимости экспериментальной и теоретической ЭПСЕ от цвета излучения представлены на рис. 6.

В рассматриваемом диапазоне цветности излучения максимум наблюдается только на зависимости экспериментальной ЭПСЕ. Максимум теоретической ЭПСЕ в данном случае, очевидно, сдвинут далеко в желтую область цветности, а его положение коррелирует с выходом зависимости световой эффективности на постоянный уровень значений. Наличие максимума на зависимости экспериментальной ЭПСЕ обусловлено хорошо выраженным

падением экспериментальной энергетической эффективности преобразования при сдвиге цвета излучения к желтой области (см. рис. 5).

Зависимость экспериментальной ЭПСЕ показывает, что наибольший световой поток для рассматриваемого светодиода лежит в диапазоне цвета излучения, выраженного через параметр C , от 1,3 до 3,1. Однако, с учетом граничных условий по цветовосприятию (не ниже среднего) и цветопередаче (не ниже 65) в качестве окончательного результата был получен оптимальный диапазон цветности излучения C от 2,2 до 3,1 (4400 – 5200 К).

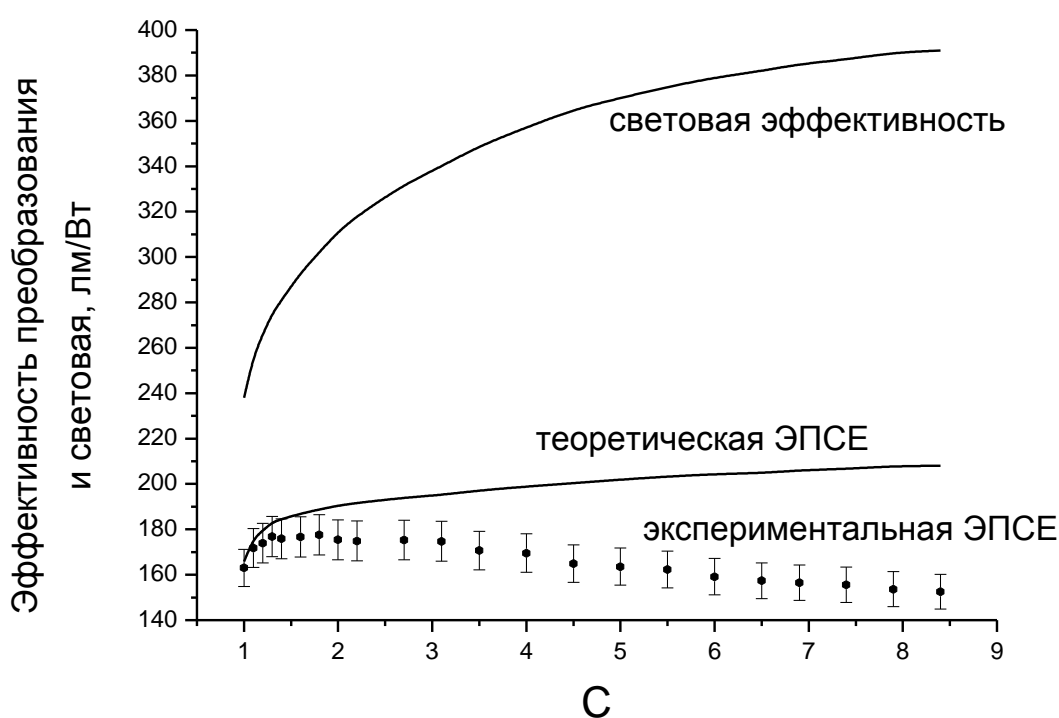


Рисунок 6 – Зависимости теоретической и экспериментальной ЭПСЕ, а также световой эффективности, от цвета излучения

Внедрение полученных результатов в производстве светодиодов ИРС-50 (SvL-05) на партии объемом 500 000 шт. в 2009 году позволило повысить средний световой поток светодиодов на 6 % и увеличить выход годных светодиодов из группы со световым потоком 80-90 лм с 1 до 20 %.

В настоящее время объем производства светодиодов ЗАО «Светлана-ОЭ», выпускаемых с обязательным применением в их технологии полученных теоретических выкладок и экспериментальных зависимостей, составляет около 100 000 шт. в месяц для светодиода SvL-05, до 200 000 шт. в месяц для светодиода SvL-01 и до 1 миллиона шт. в месяц для светодиода SvL-03. При

этом самый высокий диапазон светового потока располагается в границах от 125 до 135 лм.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. Отмечены результаты, важные для приборного применения.

Основные результаты работы

1. Определен параметр общей эффективности люминофора в светодиоде.
2. Разработана модель расчета предельной эффективности преобразования энергии излучения в белом светодиоде с фотолюминесцентным преобразователем.
3. Определена связь эффективности преобразования с конструктивными факторами.
4. Выявлен основной физический процесс, определяющий отличие экспериментальной эффективности преобразования от теоретической, – рассеяние энергии желтого излучения в виде тепла в результате взаимодействия с частицами люминофора.
5. Разработан метод оптимизации целевого параметра белого светодиода – светового потока относительно цвета излучения с учетом граничных условий по цветовосприятию и цветопередаче.
6. На основе полученных результатов освоено массовое производство белых светодиодов с конкурентноспособными параметрами.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

- 1) Феопентов А.В., Богданов А.А. Эффективность белых светодиодов // Светотехника. – 2007. – №4. – С. 32-34.
- 2) Феопентов А.В., Авакянц Л.П., Бадгутдинов М.Л., Богданов А.А., Боков П.Ю., Васильева Е.Д., Николаев Д.А., Червяков А.В., Широков С.С., Юнович А.Э. Спектры электроотражения гетероструктур с квантовыми ямами типа InGaN/AlGaN/GaN // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т.41, Вып.9. – С. 1078-1084.
- 3) Феопентов А.В., Богданов А.А. Эффективность каплевидного люминофорного слоя в мощном белом светодиоде // Светотехника. – 2009. – №4. – С. 10-12.

4) Феопентов А.В., Соломонов А.В. Исследование и оптимизация параметров мощного белого светодиода // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2010. – №9. – С. 22-27.

Другие статьи и материалы конференций:

5) Феопентов А.В., Богданов А.А. Эффективность белых светодиодов / Материалы 5-й Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы". – М.: Изд-во МГУ, 2007. – С. 65-66.

6) Феопентов А.В., Богданов А.А., Втюрина Л.М. Люминофорный слой в форме капли в белых светодиодах / Материалы 6-й Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы". – СПб.: Изд-во ФТИ РАН, 2008. – С. 86-87.

7) Феопентов А.В., Антоненков Д.А., Бауман Д.А., Богданов А.А., Васильева Е.Д., Закгейм А.Л., Закгейм Д.А., Иткинсон Г.В., Черняков А.Е. Высокомощные синие и белые светодиоды ИРС50/МК24: конструкция и характеристики в сравнении с зарубежными аналогами / Материалы 6-й Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы". – СПб.: Изд-во ФТИ РАН, 2008. – С. 130-131.

8) Феопентов А.В., Васильева Е.Д., Уелин В.В., Явич Б.С., Боков П.Ю., Иванников П.В., Чуяс А.В., Юнович А.Э. Светодиоды белого свечения на основе гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/AlGaIn/GaN / Материалы IX Российской конференции по физике полупроводников, 28 сентября – 3 октября 2009, Новосибирск – Томск, С. 13.30.

9) Феопентов А.В., Втюрина Л.М. Оптимизация светового потока мощного белого светодиода с силикатным люминофором / Материалы 7-й Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы". – М.: Изд-во МГУ, 2010. – С. 171-172.

10) Феопентов А.В., Чуяс А.В. Зависимость спектров и эффективности светодиодов белого свечения на основе гетероструктур типа InGaIn/AlGaIn/GaN, покрытых различными люминофорами, от температуры / Материалы 7-й Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы". – М.: Изд-во МГУ, 2010. – С. 247-248.