

На правах рукописи



СОЛДАТКИН ВАСИЛИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**МОДЕРНИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
СВЕТОДИОДА БЕЛОГО СВЕЧЕНИЯ
ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА**

Специальность 05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы
и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

ТОМСК – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»(ТУСУР) и в ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов».

Научный руководитель:

д.т.н., старший научный сотрудник Анатолий Александрович Вилисов.

Официальные оппоненты:

Давыдов Валерий Николаевич д.т.н., профессор, профессор кафедры электронных приборов факультета электронной техники ТУСУР.

Войцеховский Александр Васильевич д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН).

Защита состоится "30" декабря 2013 г. в 9-00 час на заседании диссертационного совета Д212.268.01 при ТУСУР по адресу: г. Томск, пр-т Ленина, 40, ТУСУР, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР по адресу: г. Томск, ул. Вершинина, 74.

Автореферат разослан "29" ноября 2013 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные составителем и заверенные гербовой печатью организации, просим высылать по адресу: 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40, ТУСУР, ученому секретарю диссертационного совета Д212.268.01 Филатову А.В.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор



А.В. Филатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Полупроводниковая светотехника в настоящее время является одним из приоритетных направлений развития науки и техники на государственном уровне многих развитых стран.

Основным элементом полупроводниковой светотехники является светодиод (СД). Его достоинства: высокая световая отдача (до 250 лм/Вт), тогда как для ламп накаливания ~ 18 лм/Вт, а для компактных люминесцентных световая отдача ~ 80 лм/Вт; длительный срок службы СД порядка 80000 часов, что в 20 раз больше срока службы ламп накаливания и в 5 раз больше, чем компактных люминесцентных ламп. СД экологически безопасен, не требует специальных средств утилизации. Именно благодаря этим качествам светодиода полупроводниковая светотехника является одним из перспективных направлений развития освещения.

Конструкция для поверхностного монтажа обеспечивает полную автоматизацию как высокопроизводительного процесса изготовления СД, так и сборки светотехнических устройств с использованием СД.

В Российской Федерации повышение эффективности освещения включено в ряд основных мероприятий Федеральной программы энергосбережения.

Основными проблемами, связанными с развитием светодиодных технологий, являются повышение световой отдачи и надёжности СД. Ряд научных коллективов в России и за рубежом работают в данном направлении. В России известны МГУ им. М.В. Ломоносова, ФТИ им. Иоффе, ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, НИ ТГУ, НИ ТПУ, ТУСУР, ОАО «НИИПП» и др. Производство светодиодов в России налажено в ЗАО «Светлана-оптоэлектроника», НПЦ ОЭП «Оптэл», ЗАО «Оптоган», ОАО «НИИПП», ОАО «Протон», ЗАО «ИФ Тетис» и др. Разработки люминофоров для белых светодиодов в России известны в основном по трудам Н.П. Сощина, а производством люминофоров занимается ООО «НПК Люминофор». Проводятся также работы по исследованию надёжности светодиодов.

В 70-е годы Ж. И. Алферов, с сотрудниками, разработали многопроходные двойные гетероструктуры, позволившие увеличить внешний квантовый выход за счет ограничения активной области рекомбинации. Японский учёный Ш. Накамура из фирмы Nichia Chemical изготовил светодиод на основе нитрида галлия и фотолуминофора, излучающего белый цвет. В 2012 году Y. Narukawa опубликовал результаты исследований, в которых получен лабораторный образец светодиода со световой отдачей 250 лм/Вт. В 2013 году Д.А. Закгейм получил на кристалле светодиода внешнюю квантовую эффективность 60%. При этом на рынке представлены промышленные образцы светодиодов со световой отдачей 120 лм/Вт. Если сегодня внутренний квантовый выход близок к 100 %, внешний не превышает на промышленных образцах 50%. Основные задачи, которые ставятся разработчиками и исследователями в направлении светодиодных технологий, являются:

повышение внешнего квантового выхода за счёт снижения доли полного внутреннего отражения (применение и разработка просветляющих покрытий, формирование рельефной поверхности и микролинзирование), повышение КПД (за счёт топологии омических контактов), увеличение световой отдачи (за счёт применения двухуровневой технологии герметизации и применения смеси люминофоров), повышение срока службы (за счёт снижения теплового сопротивления), повышение надёжности. При конструировании СД важнейшим критерием является пригодность конструкции к автоматизированной сборке [1-8].

Цель и задачи работы

Целью работы является модернизация светодиода белого свечения в корпусе для поверхностного монтажа для повышения световой отдачи и надёжности за счёт оптимизации технологии герметизации и повышения способности конструкции отводить тепло от активной области кристалла, а также исследование характеристик светодиода для расширения области применения.

Достижение цели определяется решением следующих задач:

1. Анализ путей повышения световой отдачи СД.
2. Моделирование процессов вывода света из светодиода при различных методах его герметизации.
3. Моделирование отвода тепла от активной области кристалла светодиода.
4. Применение современных материалов для отвода тепла от активной области кристалла светодиода.
5. Исследование температурных, световых и электрических зависимостей.
6. Проведение исследовательских испытаний для определения срока службы светодиода.
7. Оценка стойкости светодиода к воздействию специальных факторов.

Научная новизна:

1. Создана методика определения параметров модели двухуровневой заливки люминофорной композицией корпуса светодиода.
2. Построена модель отвода тепла от активной области светодиода в зависимости от материала подложки.
3. Доказана технологическая возможность применения поликристаллического алмаза для получения корпуса светодиода с тепловым сопротивлением 5 К/Вт.
4. Установлено, что СД с кристаллом с подложкой из карбида кремния и кристаллом с подложкой из меди выдерживают воздействие потока быстрых нейтронов с флюенсом $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны программы и методики исследовательских испытаний технологической операции герметизации светодиодов ((ЕГВА. 432225.026) 7606104.602600.01158 ПМ).

2. Усовершенствована методика ускоренных испытаний светодиода для определения срока службы.

3. Спрогнозирован срок службы разработанного светодиода для серийного производства (технические условия АДКБ.432220.418 ТУ).

4. Результаты оценки стойкости СД к воздействию быстрых нейтронов внесены в проект технических условий АЕЯР.432220.571 ТУ.

5. Разработаны новые светодиодные светотехнические устройства. На новые устройства получены положительные решения о выдаче патентов на полезные модели (заявки: №2013132267/07 приоритет от 11.07.2013.и №2013133455/12 приоритет от 18.07.2013).

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении работ по хоздоговорной тематике при выполнении проекта «Разработка высокоэффективных и надежных полупроводниковых источников света и светотехнических устройств и организация их серийного производства», выполняемого по постановлению Правительства России № 218. Документы об использовании результатов работы приведены в приложении к диссертационной работе.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники при дипломном проектировании, групповом проектном обучении, учебно- и научно-исследовательской работе студентов.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Применение двухуровневой герметизации светодиода компаундом и люминофорной композицией позволяет увеличить вывод света не менее, чем на 15%, при следующем соотношении толщин слоёв: отражатель с кристаллом на 80% по глубине заполнен компаундом с показателем преломления 1.41 и на 20% люминофорной композицией.

2. Применение поликристаллического алмаза в технологии изготовления подложки для кристалла СД позволяет обеспечить тепловое сопротивление конструкции светодиода менее 5 К/Вт, что соответствует лучшим образцам передовых мировых производителей светодиодов.

3. СД с кристаллом на подложке из карбида кремния более стойкий к воздействию облучением быстрыми нейтронами (уход среднего значения по партии максимальной силы света от нормы на 11%), чем с кристаллом на подложке из меди (уход среднего значения по партии максимальной силы света от нормы на 25%).

Достоверность полученных результатов обеспечивается комплексным подходом к решению поставленных задач, большим количеством экспериментальных данных, полученных в процессе выполнения работ, применением аттестованных методик и поверенных измерительных средств.

Апробация работы. Доклад на 8-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». – 2011.; доклад на 9-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». – 2013.; доклад на конференции «Научная сессия ТУСУР» 2012, 2013, г. Томск; доклад на конгрессе 3rd International Congress on

Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High-Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – 2012.; доклад на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики». – 2012, г. Томск, доклад на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики». – 2013, г. Томск.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 17 печатных работ в научных журналах, сборниках трудов российских и международных конференций, в том числе восемь статей в рецензируемых журналах, включая три статьи в издании, входящем в перечень ВАК.

Личный вклад автора состоит в планировании и проведении моделирования и экспериментов, в анализе результатов экспериментальных исследований, формулировке выводов. Все результаты получены автором лично или совместно с соавторами при его непосредственном участии.

Структура и объём работы: диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объём 100 страниц, включая 36 рисунков, 14 таблиц и списка литературы из 110 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику работы, где приведено обоснование актуальности темы, формулируются цель и задачи исследований, приводится краткое содержание работы.

В первой главе проведён анализ физических процессов, происходящих в светодиоде, и конструктивных особенностей элементов сборки. Описаны процесс генерации фотонов, рекомбинация и инжекция. Рассмотрен процесс вывода излучения из светодиода, проанализированы виды потерь. Рассмотрены факторы, влияющие на высокое омическое сопротивление контактов структуры GaN. Рассмотрены методы получения белого цвета свечения светодиода при использовании люминофора и люминофорных композиций. Проведён анализ влияния температуры на параметры СД и его надёжность. Проведён анализ мировых достижений в данной области.

Во второй главе приведены результаты моделирования вывода излучения из светодиода и процесса отвода тепла в зависимости от материала подложки кристалла СД.

В первой части второй главы приведены результаты исследования вывода излучения из светодиода. Известно, что показатель преломления нитрид галлиевых соединений близок к 2.5. Следовательно, велика доля полного внутреннего отражения при выводе света из кристалла. Потери излучения, связанные с внутренним отражением, можно оценить по формуле [1]:

$$P_2/P_1 \approx (1/4) n_2^2/n_1^2, \quad (1)$$

где P_1 – мощность излучения, генерируемого в среде с показателем преломления n_1 , P_2 – мощность излучения, прошедшая в среду с показателем преломления n_2 .

Компаунд, которым герметизируется кристалл и который служит связующей составляющей для люминофора, имеет показатель преломления от 1.41 до 1.53 в зависимости от производителя, а люминофор, который по весу добавляют в этот компаунд от 7 до 40 %, имеет показатель преломления в диапазоне от 1.5 до 1.85.

На рис.1 видно, что с ростом показателя преломления люминофорной композиции доля оптической мощности сгенерированной внутри кристалла СД растёт.

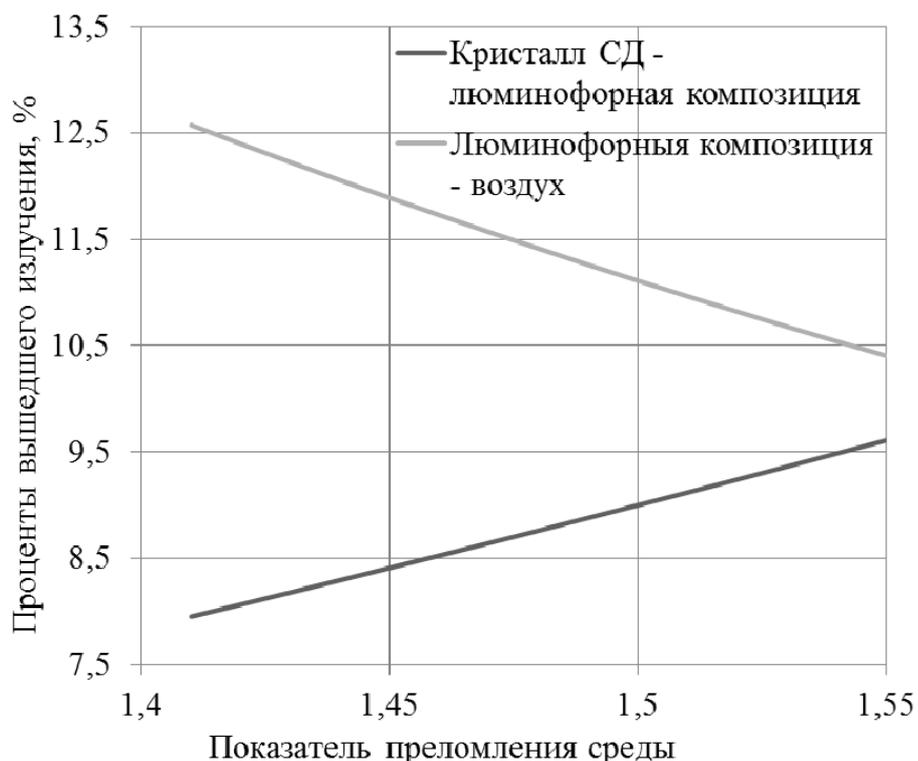


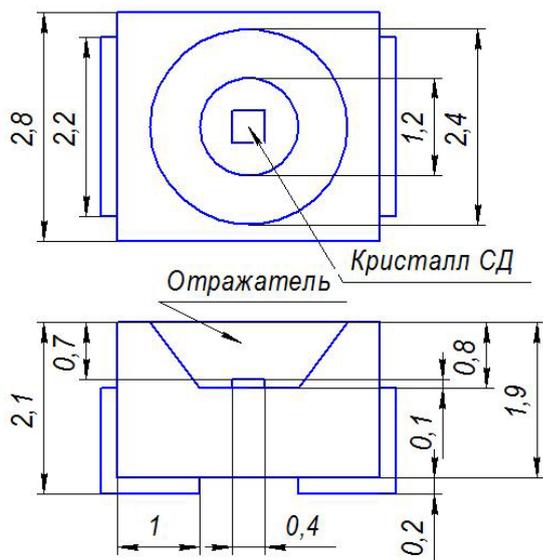
Рис. 1. Аналитическая зависимость доли мощности излучения, прошедшей из кристалла в люминофорную композицию и из люминофорной композиции в воздух, в зависимости от показателя преломления люминофорной композиции (Излучение люминофора и поглощение излучения люминофором не учитывались)

Компаунды с показателем преломления 1.5 имеют стоимость на порядок выше компаундов с показателями преломления в диапазоне 1.41 – 1.47. Поэтому, проработаны варианты с использованием компаундов с показателем преломления 1.41 и 1.45.

Исследование вывода света из СД в зависимости от метода герметизации проведено с помощью программного обеспечения в Lambda Research Corporation TracePRO в форме моделирования с учётом пропорций по толщине слоёв.

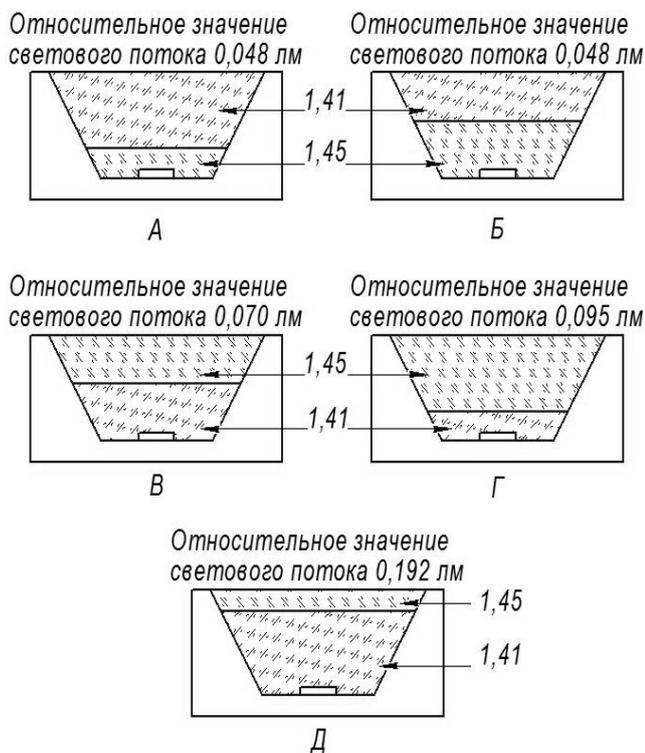
Моделирование проводилось с учётом размеров корпуса и кристалла СД. Отражатель имеет глубину 0,8 мм, с внешним диаметром 2,4 мм и внутренним 1,2 мм. Размеры кристалла приняты $400 \times 400 \times 100$ мкм³. Кристалл смонтирован в центр отражателя.

Рис. 2. Чертёж СД отражателя, кристалла и корпуса



На рисунке показан чертёж СД, который взят за основу для моделирования в Lambda Research Corporation TracePRO. Корпус СД выполнен из пластмассы белого цвета, отражатель не покрыт специальными материалами для увеличения отражательной способности. Данный тип корпуса удобен для автоматизированной сборки и монтажа, по этому, пригоден для серийного производства.

Рис. 3. Методы герметизации светодиода



На рисунке показано значение относительного светового потока, полученного в результате моделирования для каждого из вариантов. Установлено, что максимальное значение достигается при двухуровневой герметизации, где отражатель светодиода заполнен на 80% от поверхности кристалла люминофорной композицией с показателем преломления 1,41 и на 20%, на втором уровне люминофорной композицией с показателем преломления 1,45 (вариант Д) [1.4].

На рис. 3 показаны результаты моделирования вывода света из СД в зависимости от метода герметизации. А – отражатель светодиода заполнен на 20% от поверхности кристалла люминофорной композицией с показателем преломления 1,45 и на 80%, на втором уровне люминофорной композицией с показателем преломления 1,41. Б – отражатель светодиода заполнен на 50% от поверхности кристалла люминофорной композицией с показателем преломления 1,45 и на 50%, на втором уровне люминофорной композицией с показателем преломления 1,41. В – двухуровневая герметизация (люминофорная композиция с показателем преломления 1,41 (50%) + люминофорная композиция с показателем преломления 1,45 на втором уровне 50%). Г – двухуровневая герметизация (люминофорная композиция с показателем преломления 1,41 (20%) + люминофорная композиция с показателем преломления 1,45 на втором уровне 80%). Д – двухуровневая

герметизация (люминофорная композиция с показателем преломления 1,41 (80%) + люминофорная композиция с показателем преломления 1,45 на втором уровне 20%).

Во второй части второй главы приведены результаты исследования процесса отвода тепла в зависимости от конструкции кристалла СД. Известно, что тепло оказывает влияние на квантовый выход (световую отдачу) СД, на его надёжность. Возможны катастрофические отказы при высоких температурах эксплуатации в виде термоэлектрических пробоев и обрыву электрических соединений между кристаллом и корпусом СД. Повышенная температура эксплуатации снижает срок службы СД, активируя физико-химические процессы деградации полупроводника.

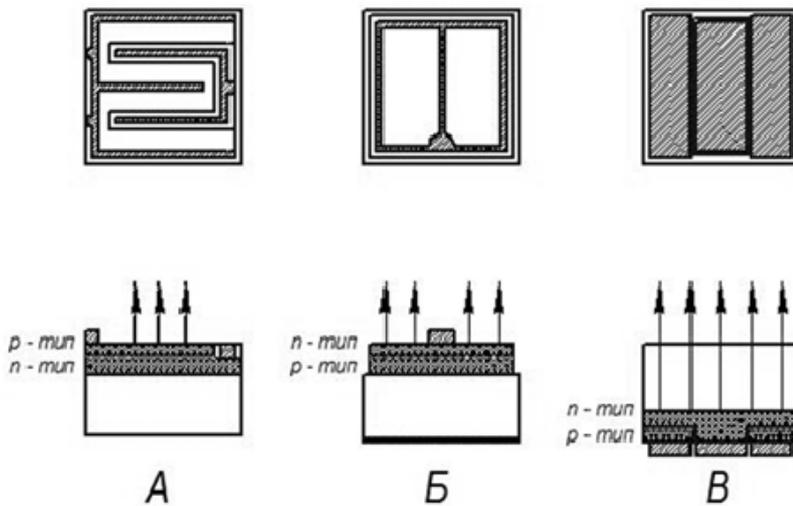


Рис. 4. Основные виды конструкции кристаллов СД

На рисунке: А – планарная конструкция, вывод света осуществляется через плоскость, на которой находятся контакты к *n* и *p* слою. Полупроводниковые нитридные слои с общей

толщиной 5 мкм расположены на ростовой подложке из сапфира с толщиной 100 мкм. Б – вертикальная конструкция, где свет выводится через плоскость с контактом, при этом второй контакт расположен на противоположной плоскости. В – разновидность планарного кристалла предназначенного для перевёрнутого монтажа (flip-chip), вывод света осуществляется через подложку а контакты находятся на противоположной к ней поверхности.

Планарный кристалл с подложкой из сапфира (производители: Epistar, Epiled) имеет основные недостатки: требуется дополнительное электрическое соединение проволокой омического контакта; отвод тепла через сапфировую подложку. Вертикальный кристалл с подложкой из карбида кремния, меди и кремния (производители: Cree, Semileds, Osram) имеет основные недостатки: для медной и кремниевой подложек требуется сложная технологическая операция обратной литографии (lift-off), которая может привести к увеличению числа дефектов в полупроводнике; для карбид кремниевой подложки высокая стоимость материала. Планарный кристалл для перевёрнутого (flip-chip) монтажа (производители: Philips-lumiled, ЗАО «Светлана-оптоэлектроника», ЗАО «ИФ Тетис») имеет основные недостатки: для монтажа кристалла требуется автоматизированная установка с высокой точностью позиционирования (погрешность не более 10 мкм).

Оценить способность отвода тепла от активной области можно используя следующие формулы для определения теплового сопротивления [1]:

$$P_e = (T_1 - T_2)/R_b, \quad (2)$$

P_e - мощность, рассеиваемая в данном компоненте; T_1 , T_2 – температуры двух тел или тела и среды (T_1 более высокая температура, чем T_2).

$$R_t = \delta / (\lambda \times S), \quad (3)$$

где, δ – толщина слоя (м); S – площадь слоя (м²); λ – теплопроводность вещества Вт/м×К.

Исходя из данных формул, можно варьируя материал подложки графически представить зависимость теплового сопротивления от площади кристалла. Во всех приведённых на рис. 5 случаях рассеиваемую мощность примем равной одному Ватту и в качестве граничного условия примем направление отвода тепла через подложку. Отвод тепла через подложку обусловлен тем, что в светодиодах используют компаунды, которые закрывают все грани кристалла кроме нижней части подложки, на которую осуществляется монтаж. Как правило теплопроводность компаунда составляет не более 0,05 Вт/м×К, что на несколько порядков ниже теплопроводности меди или карбида кремния.

Таблица 1. Значения теплового сопротивления для кристалла с размерами 1000×1000×100 мкм³ для различных материалов подложки

Материал подложки	Тепловое сопротивление, К/Вт
Al ₂ O ₃ (Сапфир), теплопроводность 46 Вт/м×К	2,17
SiC (Карбид кремния), теплопроводность 120 Вт/м×К	0,83
Si (Кремний), теплопроводность 159 Вт/м×К	0,63
Cu (Медь), теплопроводность 400 Вт/м×К	0,25
Поликристаллический CVD алмаз, теплопроводность 600 Вт/м×К	0,17

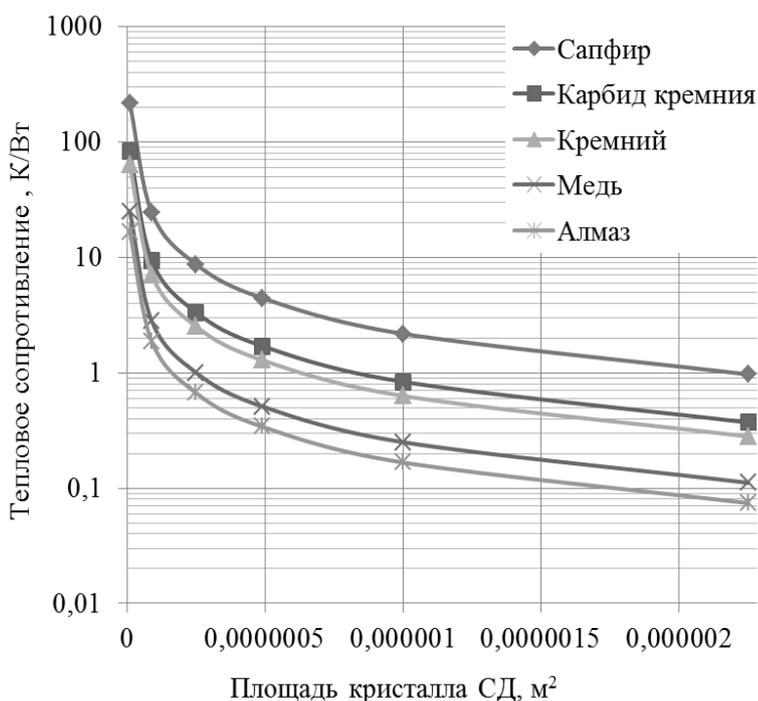


Рис. 5. Зависимость теплового сопротивления от площади кристалла для материалов подложки из сапфира, карбида кремния, кремния, меди и алмаза

Из рисунка видно, что значения теплового сопротивления для разных материалов подложки различны. Наибольшим тепловым сопротивлением обладают кристаллы с сапфировой подложкой, а наименьшим кристаллы с алмазной подложкой.

Результаты моделирования в программе Ansys кристалла СД с габаритными размерами $1000 \times 1000 \times 100$ мкм³ и рассеиваемой мощностью один Ватт с подложками из сапфира, меди и поликристаллического алмаза показали:

- для кристалла с подложкой из сапфира, температура на подложке составляет 25°C , температура в активной области кристалла СД $28,545^{\circ}\text{C}$, что даёт $R_t = 3,545$ К/Вт;

- для кристалла с подложкой из меди, температура на подложке $T_1 = 25,244^{\circ}\text{C}$, температура в активной области кристалла СД $T_2 = 25^{\circ}\text{C}$, $R_t = 0,244$ К/Вт;

- для кристалла с подложкой из поликристаллического алмаза, температура на подложке $T_1 = 25,172^{\circ}\text{C}$, температура в активной области кристалла СД $T_2 = 25^{\circ}\text{C}$, $R_t = 0,172$ К/Вт.

Результаты моделирования соответствуют расчётным значениям таблицы 1. Из результатов моделирования видно, что наименьшим тепловым сопротивлением обладает кристалл СД с подложкой из поликристаллического алмаза [1.8, 2.9].

В третьей главе приведены результаты исследования экспериментальных образцов СД. Проведены исследования жёлто-зелёных фотолюминофоров (таблица 2).

Таблица 2. Параметры люминофоров

	LMY60C	LMY65C	LMY70C
Плотность, гр/см ³	4,3	4,34	4,7
Доминирующая длина волны излучаемая, нм	548	554	565
Длина волны возбуждения, нм	450– 460	457.5 – 465	465 – 470

Проведено измерение характерного размера частиц люминофора. Измерение размера частиц (фотографии при увеличении) и определение химического состава люминофора проводилось на электронном микроскопе ТМ-1000 Tabletop SEM Hitachi. Порошок люминофора наносили на клейкую плёнку и помещали в держатель, держатель устанавливали в электронный микроскоп.

Характерный размер частиц люминофора LMY60C ~ 3,7 мкм, разброс по их размерам от 3,25 мкм, до 10,2 мкм. Характерный размер частиц люминофора LMY65C ~ 7 мкм, разброс по их размерам от 4,09 мкм, до 9,93 мкм. Характерный размер частиц люминофора LMY70C ~ 4 мкм, разброс по их размерам от 3,63 мкм, до 5,70 мкм. У люминофора LMY70C минимальный разброс размеров 2,07 мкм, у LMY65C 5,84 мкм, у LMY60C 6,95 мкм.

Изготовлены экспериментальные партии образцов СД с каждым типом люминофора. Для изготовления образцов выбран кристалл производства фирмы Cree с подложкой из карбида кремния с максимумом длины волны 460 нм, мощностью оптического излучения 21 мВт и размерами 290×290 мкм². Кристаллы смонтированы в корпуса СД при помощи электропроводящего клея, контакты корпуса и кристалла соединены методом сварки. Приготовлена смесь компаунда и люминофора. В три ёмкости был налит оптически прозрачный

двухкомпонентный компаунд и, затем по весу в каждую ёмкость добавлено 7% люминофора. Отражатели заготовок образцов СД заполнены смесью компаунда с люминофором. После сушки в печи в течение 10 минут при 100⁰С проведены измерения постоянного прямого напряжения с точностью до третьего знака после запятой при стабилизации по постоянному прямому ток 20 мА. Напряжение соответствовало диапазону, указанному производителем кристаллов (3,000 – 3,100) В. Далее проведены измерения значения максимальной силы света на экспериментальных образцах СД при прямом токе 20 мА и температуре окружающей среды (25±3)⁰С. Измерения проводились на установке, состоящей из скорректированного фотоприёмника и гониометра подключенных к компьютеру. Фотоприёмник скорректирован под кривую относительной спектральной световой эффективности для дневного зрения по ГОСТ 8.332 – 78. На источнике электрического питания СД со стабилизацией по току устанавливали значение прямого постоянного тока 20 мА, затем при повороте поворотного устройства гониометра с СД данные в виде графика распределения кривой силы света выводились на экран монитора. Из графиков в протокол измерений вписывалось значение максимальной силы света для каждого светодиода и угол излучения по уровню 0,5 от максимума силы света. Для корректного сравнения, поставлено требование - диапазон угла излучения по уровню 0,5 у образцов СД 110 – 120 град. Фактически, по результатам измерений угол по уровню 0,5 был в диапазоне 115±3 град. После обработки и определения среднего, максимального и минимального значения силы света по каждой из трёх партий СД, данные внесены в таблицу 3. Параллельно с измерением силы света осуществлялось измерение цветовой температуры с помощью спектроколориметра. Результаты измерений затем обрабатывались.

Таблица 3. Результаты исследования экспериментальных образцов СД, изготовленных с разными по спектру излучения люминофорами

	LMY-60-C		LMY-65-C		LMY-70-C	
	I _v , кд	T _ц , К	I _v , кд	T _ц , К	I _v , кд	T _ц , К
Максимальное значение	1.1	6500	1,43	3850	1,22	3500
Среднее значение	1.0	6300	1,3	4300	1,15	4200
Минимальное значение	0,97	6000	1,17	4700	1,05	4470

Примечание: I_v, кд – сила света в максимуме кривой силы света: T_ц, К – цветная температура.

В результате экспериментальных исследований установлено, что СД, изготовленные с применением люминофора LMY-65-C с доминирующей длиной волны 554 нм, обладают тёплым оттенком белого цвета (3800 К) и, в отличие от СД с люминофорами с доминирующими длинами волн излучения 548 и 565 нм. СД с люминофором LMY-65-C имеют наибольшую эффективность - сила света больше на (15-20)%. Данные результаты

обусловлены тем, что максимум излучения люминофора находится в области 554 нм, что практически совпадает с максимумом фотооптической функции человеческого глаза 555 нм для дневного зрения.

Далее приведены результаты исследования и отработки технологии герметизации СД.

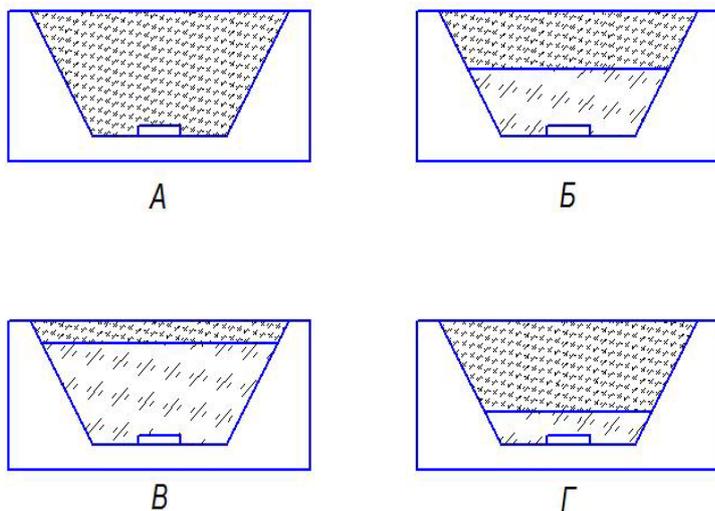


Рис. 6. Варианты герметизации СД

На рисунке А – отражатель СД полностью заполнен люминофорной композицией (8% люминофора по весу в компаунде); Б – отражатель до половины заполнен компаундом, затем люминофорной композицией; В – отражатель на

80% заполнен компаундом, затем люминофорной композицией; Г – 20% отражателя заполнено компаундом, затем остальные 80% отражателя заполнены люминофорной композицией.

По изображённым на рис.6 вариантам изготовлены партии образцов СД. Измерено значение максимальной силы света для каждого образца СД из четырёх партий и рассчитано её среднее значение.

Таблица 4. Результаты исследования экспериментальных образцов СД, изготовленных по различным технологиям герметизации

Вариант герметизации	А	Б	В	Г
Среднее значение силы света (I_v), кд	1.3	1.29	1.45	1.31

Для изготовления светодиодов белого цвета свечения наиболее эффективным является применение двухуровневой технологии герметизации. На первом уровне в отражатель на кристалл наносится 80% компаунда. Осуществляют его сушку до затвердевания, затем на втором уровне отражатель до краёв заполняется люминофорной композицией. Такая технология герметизации позволяет увеличить световую отдачу светодиода более чем на 25% по сравнению с одноуровневой герметизацией смесью компаунда и люминофора.

Изготовлены образцы мощных СД с кристаллами 1000×1000 мкм² и рабочим током 350 мА. Целью изготовления данных образцов являлось сравнить световые отдачи СД до и после герметизации люминофорной композицией в широком диапазоне постоянных токов и определить при каких токах отношение световой отдачи СД после герметизации к СД до герметизации является максимальным.

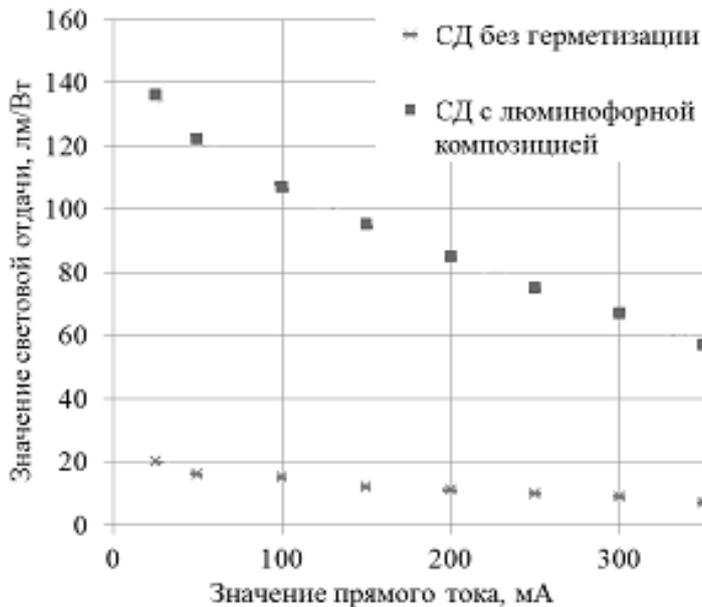


Рис. 7. Экспериментальная зависимость световой отдачи СД от прямого тока до и после герметизации люминофорным композитом

Из рисунка видно, что зависимость световой отдачи СД до герметизации более линейная, чем после герметизации. Зависимости существенно отличаются друг от друга, причём снижается значение световой отдачи с ростом постоянного тока до и после герметизации не

Видно, что основную роль в данной зависимости играет люминофор.

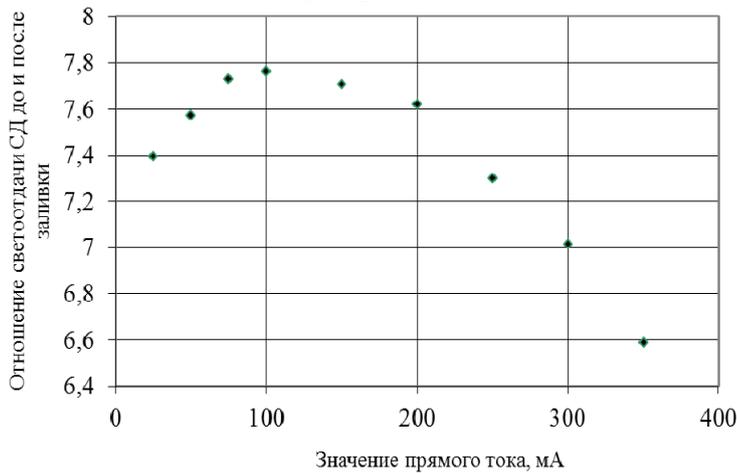


Рис. 8. Экспериментальная зависимость отношения световой отдачи СД до и после герметизации от прямого тока

Если взять отношение значений световой отдачи до и после заливки, видно, что максимально эффективно люминофор работает на образце СД с прямым током

100 мА, в диапазоне от 75 мА до 200 мА. Рабочий ток СД составляет 350 мА. Из проведённых исследований следует, что для получения высоких значений световой отдачи рекомендуется эксплуатировать СД при токах 100 мА.

Проведены исследования влияния температуры на характеристики СД.

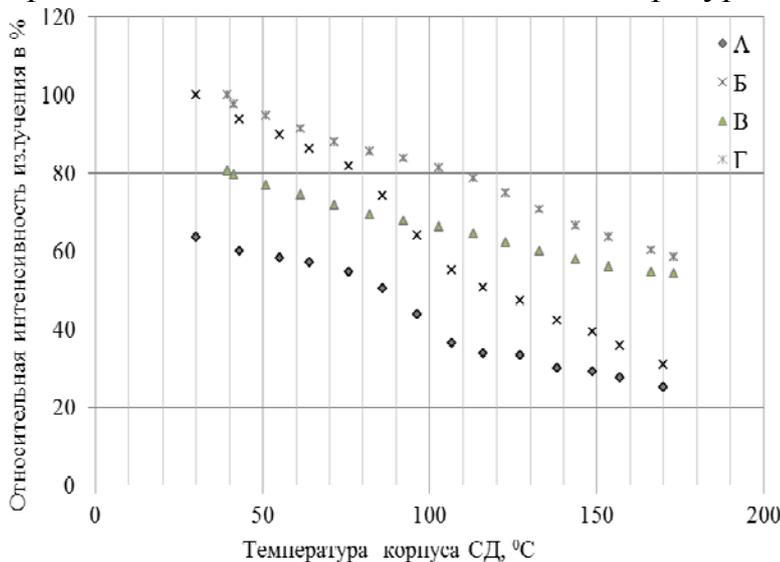


Рис. 9. Экспериментальная зависимость относительной интенсивности излучения: А – кристалла от температуры при прямом токе СД 20 мА; Б – люминофора от температуры при прямом токе через СД 20 мА; В – кристалла от температуры при прямом токе СД 350 мА; Г – люминофора от температуры при прямом токе через СД 350 мА

Из рисунка видно, что зависимость интенсивности излучения от температуры при прямом токе 350 мА близка к линейной, как для кристалла, так и для люминофора, причём формы этих зависимостей сходны. Следовательно, можно говорить о том, что на интенсивность излучения люминофора прямое воздействие оказывает кристалл СД. Для зависимостей интенсивности излучения при прямом токе 20 мА наблюдается изменение линейности характеристик при температуре выше 85 °С. В обоих случаях видно, что при высоких температурах свыше 150°С интенсивность излучения люминофора падает сильнее, чем кристалла.

Проведены исследования СД с подложкой из поликристаллического алмаза с кристаллом 1000×1000 мкм². Для сравнения были изготовлены с таким же кристаллом образцы в стандартных металло-пластмассовых корпусах с размерами 5 × 5 мм². Так же для сравнения были измерены значения теплового сопротивления образцов СД иностранного производства: СД производства Cree серии XLamp® XP-G LED и СД Rebel производства Lumiled-Philips. Значение теплового сопротивления определялось на установке, методом подачи греющего токового импульса. Образец СД был установлен в держатель, который подключен к клеммам измерительной установки. В управляющей программе заданы параметры нагрева и измерения греющий ток (350 мА), время действия греющего тока (100 мс) и прямое напряжения при токе 5 мА. После измерения характеристик СД определён температурный коэффициент напряжения (ТКН = 2 мВ/К) и разница значений прямого напряжения между нагретым и не нагретым СД. Значение выделяемой мощности определяется установкой автоматически. По измеренным данным рассчитана величина теплового сопротивления. По результатам измерений каждого образца СД, определено среднее значение. Среднее значение теплового сопротивления для каждой партии СД внесено в таблицу 5.

Таблица 5. Среднее значение теплового сопротивления (в К/Вт) по измерениям 20 шт. СД каждого типа

Макеты СД с CVD алмазом	СД производства Cree серии XLamp® XP-G LED	СД Rebel производства Lumiled-Philips	Макеты СД собранных в стандартном корпусе 5 × 5 мм
5,54±0,5	6,49±0,3	6,35±0,25	21,07±1,25

Из таблицы 5 видно, что экспериментальные образцы СД с алмазной подложкой имеют тепловое сопротивление в четыре раза меньше, чем образцы в металло-пластмассовых корпусах 5 × 5 мм². По значению теплового сопротивления образцы СД с алмазной подложкой соответствуют образцам СД производства Cree и Lumiled-Philips. На рис. 8 видно, что в диапазоне токов от 25 мА до 1100мА зависимость относительного светового потока от прямого тока близка к линейной. При прямых токах выше 1100 мА наблюдается уход от линейности и начинается спад значений светового потока связанный с тепловыми процессами в кристалле СД. Номинальный рабочий ток СД с этими кристаллами 350 мА.

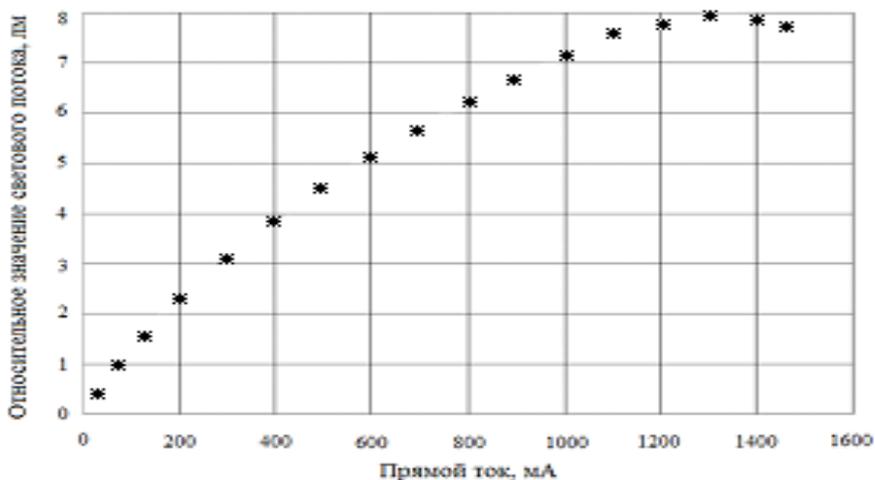


Рис.10. Зависимость относительного светового потока от прямого тока на экспериментальном образце СД с использованием алмазной подложки

Экспериментальные образцы СД с алмазной подложкой имеют большой конструктивно-технологический запас по электрической нагрузке и являются на порядок надёжнее образцов с СД изготовленных в металло-пластмассовых корпусах [1.8, 2.6].

В четвёртой главе приведены результаты испытаний по определению срока службы и стойкости к облучению СД быстрыми нейтронами.

Для оценки срока службы СД в Российской Федерации принято использовать ОСТ11-336.938-83 «Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность». Но так как в табличных данных значение энергии активации не указано, необходимо проводить исследовательские испытания по определению этого значения. Для этого проведены ступенчатые испытания. Изготовлена партия экспериментальных образцов индикаторных СД. Из партии выбраны по 20 шт. две группы СД. Измерены значения прямого напряжения и значение максимально силы света на экспериментальных образцах образце СД. Последовательно проведены ступенчатые испытания с ежедневным повышением термо-электрической нагрузки до момента появления отказов. Испытана первая группа из 20 СД, затем на том же оборудовании и при тех же режимах вторая группа СД. По результатам проведённых испытаний построен график зависимости времени наработки до отказа от температуры испытаний.

Таблица 6. Результаты ступенчатых испытаний образцов СД

Количество образцов, шт	Режимы испытаний	Температура р-п перехода в Q(C), T(K)	Время наработки на отказ t (час)	Функция режима испытаний $10^3/T$	Функция времени испытаний $\ln t$	Количество отказов, шт.
20	$I_{пр}=55\text{мА};$ $U_{пр}=3,2\text{В};$ $T_{окр}=85^{\circ}\text{C}$	$111,4^{\circ}\text{C};$ $384,4\text{К}$	24	2,6014	3,178	4
20	$I_{пр}=30\text{мА}$ $U_{пр}=3,2\text{В}$ $T_{окр}=52^{\circ}\text{C}$	$66,417^{\circ}\text{C};$ $339,417\text{К}$	500	2,9462	6,214	1

Из таблицы 6 видно, что в процессе испытаний зафиксированы 5 отказов образцов СД. 4 отказа при испытании в одинаковых режимах через наработки 24 часа и один после наработки 500 часов.

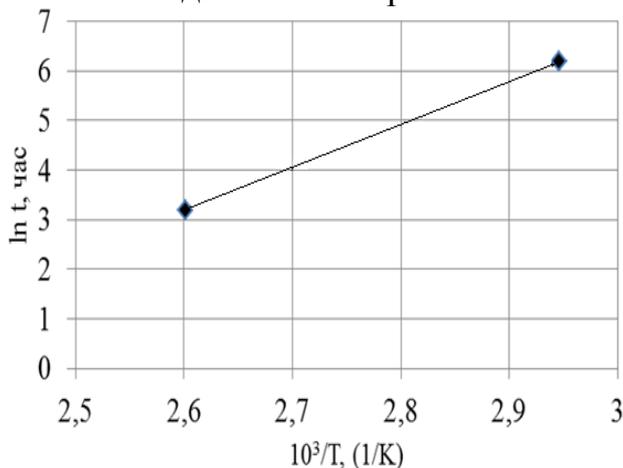


Рис. 11. График зависимости времени наработки до отказа от температуры испытаний

По результатам ступенчатых испытаний СД приведённых в таблице 6 построен график рис. 11.

Энергия активации отказов определяется из данных таблицы 6 и рис. 11 [9]:

$$E_a = 8,62 \times 10^{-2} \times ((\ln t_a - \ln t_b) / ((10^3 / T_A) - (10^3 / T_b)),$$

$$E_a = 8,62 \times 10^{-2} \times ((6,2 - 3,2) / (2,9462 - 2,6014)),$$

отсюда $E_a = 0.75$ эВ – энергия активации отказов для СД белого свечения и коэффициент форсирования, K_y равен:

$$K_y = \exp(E_a / k) \times (1 / (Q_{pn} + 273) - (1 / (Q_{pny} + 273)))$$

где k – постоянная Больцмана; Q_{pn} – температура р-п перехода в нормальных условиях эксплуатации (в рабочем режиме), $^{\circ}\text{C}$; Q_{pny} – температура р-п-перехода в ускоренном режиме испытаний, $^{\circ}\text{C}$. Коэффициент форсирования позволяет определить режимы ускоренных испытаний СД. Для расчёта срока службы $t_{ном}$ по результатам ускоренных испытаний следует воспользоваться формулой [9]:

$$t_{ном} = t_y \times K_y,$$

где t_y – время ускоренных испытаний, K_y – коэффициент форсирования.

Проведены ускоренные испытания на образцах светодиодов в течение 1000 часов. По результатам испытаний на рис.12 построен график зависимости срока службы СД от температуры.

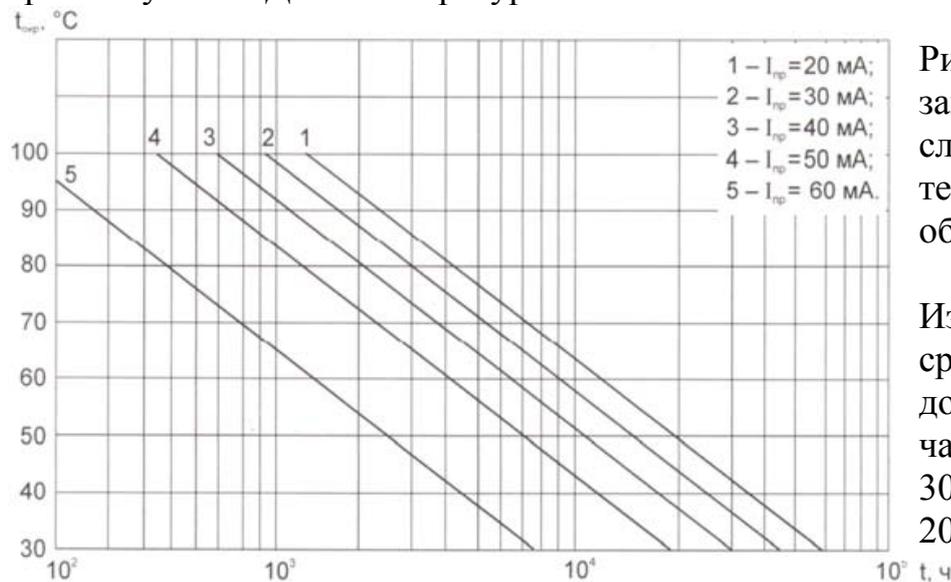


Рис. 12. Расчетная зависимость срока службы СД от температуры активной области кристалла

Из рисунка видно, что срок службы СД достигает 60 тыс. часов при температуре 30°C и прямом токе 20 мА.

Поскольку разрабатываемые СД предназначены и для применения в спецаппаратуре, проведены исследовательские испытания воздействия облучением быстрыми нейтронами. Для оптимизации конструкции исследования проводились на партиях СД с разными подложками. Изготовлены две партии образцов индикаторных СД с кристаллами с подложкой из карбида кремния и кристаллами с подложкой из меди. Образцы залиты компаундом без люминофора. Измерены значения прямого напряжения, силы света и максимума длины волны излучения при токе 20 мА и температуре $(25\pm 3)^\circ\text{C}$. После проведения испытаний воздействием импульсом нейтронного облучения образца СД были законсервированы и хранились до того как их собственный радиационный фон будет соответствовать значениям, допустимым для работы персонала. Затем проведены измерения значения прямого напряжения, силы света и максимума длины волны излучения при токе 20 мА и температуре $(25\pm 3)^\circ\text{C}$. Посчитаны средние значения и приведены в таблице 7.

Таблица 7. Средние значения светотехнических и электрических параметров партии СД синего свечения с кристаллом вертикального типа на SiC и медной подложке до и после облучения быстрыми нейтронами с флюенсом $5\times 10^{13}\text{ см}^{-2}$

Наименование параметра, единица измерения (режим измерения $I_{\text{пр}}=20\text{ мА}$, $T_{\text{окр.ср.}}=(25\pm 5)^\circ\text{C}$)	СД синего свечения с кристаллом вертикального типа на SiC подложке				СД синего свечения с кристаллом вертикального типа на медной подложке			
	Значение параметров до облучения		Значение параметров после облучения быстрыми нейтронами с флюенсом $5\times 10^{13}\text{ см}^{-2}$		Значение параметров до облучения		Значение параметров после облучения быстрыми нейтронами с флюенсом $5\times 10^{13}\text{ см}^{-2}$	
	Не менее	Не более	Не менее	Не более	Не менее	Не более	Не менее	Не более
Максимальная длина волны излучения, нм	460	462.5	460	462.5	460	462.5	460	462.5
Сила света, кд	0.2		0.17		0.2		0.15	
Прямое напряжение, В		3.7		3.7		3.7		3.7
Угол излучения по уровню 0.5, град	100		100		100		100	
Уход значения силы света от нормы	значение силы света снизилось на 11%.				значение силы света снизилось на 25%			

Результаты испытаний показали, что данные светодиоды являются стойкими к воздействию облучением быстрыми нейтронами с флюенсом $5 \cdot 10^{13}$ см⁻². Разница значений после испытаний для светодиодов с кристаллами на карбиде кремния и с кристаллами на медной подложке может быть обусловлена особенностями технологии изготовления кристаллов, их уровнем легирования магнием и кремнием для повышения числа носителей заряда в *n*- и *p*- областях полупроводника.

Важным является тот факт, что отсутствуют катастрофические отказы у светодиодов в процессе и после испытаний, а так же деградация после воздействия спец. факторов по световым параметрам не превысила 30% от первоначального значения (до испытаний). Значение электрических и спектральных параметров после испытаний не изменились, а снижение значения силы света обусловлено радиационными дефектами, следствием которых является образование центров безызлучательной рекомбинации. Результаты данных исследований положены в основу технических условий для серийного производства [1.3, 2.3].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведены аналитические расчёты и построена модель вывода излучения из СД, позволяющая анализировать световую отдачу в зависимости от характеристик материалов (расстояние между люминофорной композицией и кристаллом, показатель преломления компаунда) покрытия кристалла (компаунда и люминофора).

2. Построена модель распределения тепла в кристалле СД в зависимости от материалов его подложки. Установлено, что наиболее эффективный отвод тепла от активной области кристалла СД обеспечивает подложка из поликристаллического алмаза.

3. Экспериментальные исследования позволяют установить значения параметров (световая отдача, тепловое сопротивление) и обеспечивают достоверность методов сравнения полученных в работе результатов с мировыми достижениями в данной области.

4. Проведённые испытания по определению срока службы СД позволили спрогнозировать его ресурс и построить достоверную математическую модель, позволяющую задавать параметры электрической и тепловой нагрузки и определять ресурсный срок службы СД.

5. Проведённые исследования стойкости СД к облучению быстрыми нейтронами позволили сравнить стойкость кристаллов СД с подложками из меди и карбида кремния и показали, что в целом СД обладают стойкостью к воздействию быстрыми нейтронами с флюенсом 5×10^{13} см⁻², что позволяет их применять в специальной технике: в условиях ядерного взрыва, в ядерных энергетических установках и космической технике.

6. Разработанная конструкция и технология изготовления послужили основой конструкторской и технологической документации и Технических условий для изделий серийного производства (Акт внедрения от 05.12.2012.).

СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
2. Nakamura S., Fasol G. The Blue Laser Diod (Springer, Berlin). – 1997. – С. 335.
3. Narukawa Y., Ichikawa M., Sanga D., Sano M., Mukai T. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy // Journal of Physics: Applien Physics. – 2010. – № 43.
4. Закгейм Д.А., Бауман Д.А. AlGaInN светодиоды с внешней квантовой эффективностью 60% // Материалы 9-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». – 2013. – С.22-23.
5. Kim J.K., Luo H., Schubert E.F. et al. // Jpn. J. Appl. Phys. – 2005. № 44.
6. Патент 2416841 Российская Федерация, МПК H01L33/00. Конструкция светодиода с люминофором / Н.А. Гальчина, Коган Л.М. – Приоритет от 09.04.2010. – заявка от 09.04.2010 ; опубл. 20.04.2011.
7. Воробьев А.А., Воробьева Е.В. и др. Моделирование теплового режима полупроводниковых приборов с различными типами теплоотводов // Твердотельная электроника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 2(505). – С. 12-20.
8. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов // Компоненты и технологии. – 2006. – №54. – С. 42-47.
9. ОСТ 11-336.938-83 Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность. – 1983.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Научные статьи

- 1.1 Вилисов А.А., Дохтуров В.В., Тепляков К.В., Солдаткин В.С. Индикаторные светодиоды для поверхностного монтажа // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – Т. 5, № 13. – С. 50-51.
- 1.2 Вилисов А., Калугин К., Солдаткин В., Перминова Е. Белые светодиоды // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – Т. 4, № 18. – С. 14-17.
- 1.3 Солдаткин В.С., Вилисов А.А., Градобоев А.В., Асанов И.А., Тепляков К.В. Стойкость GaN-светодиодов к облучению нейтронами // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9-2. – С. 290-291.
- 1.4 Серебренникова И.В., Маломуж П.А., Солдаткин В.С., Туев В.И. Моделирование световых характеристик светодиода для систем освещения // Технические науки - от теории к практике. – 2013. – № 21. – С. 174-179.

1.5 Литвинова М.Н., Солдаткин В.С., Туев В.И. Проектирование уличного освещения // Технические науки - от теории к практике. – 2013. – № 24. – С. 28-38.

1.6 Litvinova M.N., Malomuj P.V., Soldatkin V.S., Tuev V.I. Street lighting simulation // Innovations in information and communication science and technology. Third Postgraduate Consortium International Workshop ICST 2013. – 2013. – С.107-112.

1.7 Гончарова Ю.С., Гарипов И.Ф., Солдаткин В.С. Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на долговечность // Доклады ТУСУРа. – 2013. – №2. – С. 51-53.

1.8 Вилисов А.А., Ремнёв Г.Е., Линник С.А., Солдаткин В.С., Тепляков К.В. Светодиод с CVD алмазным теплоотводом // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – № 8/3. – С. 169-171.

2. Материалы докладов на симпозиумах, конференциях, семинарах

2.1 Вилисов А.А., Гарипов И.Ф., Дохтуров В.В., Короченко Д.И., Курило Ю.М., Солдаткин В.С., Тепляков К.В., Токарев А.В. Светодиоды для поверхностного монтажа // 8-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». – 2010. – 1 с.

2.2 Вилисов А.А., Солдаткин В.С., Тепляков К.В., Устюгов С.Н. Разработка мощных светодиодов белого цвета свечения для поверхностного монтажа // Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2012». – 2012 – Т. 2. – 2 с.

2.3 Asanov I.A., Vilisov A.A., Gradoboev A.V., Soldatkin V.S., Tepljakov K.V. Firmness of light-emitting diodes for the superficial installation of white colour of the luminescence to action of factors of radiative action // 3rd International Congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High-Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. - 2012. – С. 111-112.

2.4 Щербина В.В., Бородин М.В., Смычков С.А., Шандаров С.М., Серебренников Л.Я., Хан А.В., Солдаткин В.С. Исследование волноводных свойств эпитаксиальной структуры GaN/InGaN на подложке из сапфира // Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике, Москва. – 2012. – 1 с.

2.5 Вилисов А.А., Екимова И.А., Солдаткин В.С., Туев В.И. Люминофор для светодиода // Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2013». – 2013 – Т. 2. – С. 63-65.

2.6.Вилисов А.А., Линник С.А., Ремнёв Г.Е., Солдаткин В.С., Тепляков К.В. Применение поликристаллического CVD алмаза для эффективного отвода тепла в мощных светодиодах // 9-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». – 2013. – С. 180-181.

Тираж 100 экз. Заказ 1170.
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники.
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. (3822) 533018.