

Министерство образования и науки Российской Федерации
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

В.С. Солдаткин, А.А. Вилисов

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
СВЕТОДИОДНЫХ КРИСТАЛЛОВ**

Учебное пособие

Томск 2017

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»
(ТУСУР)

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга
(РЭТЭМ)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий каф. РЭТЭМ
_____ В.И. Туев
« ____ » _____ 2017 г.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Учебное пособие

Разработал:

Доцент каф. РЭТЭМ
_____ В.С. Солдаткин

Профессор каф РЭТЭМ
_____ А.А. Вилисов

Томск 2017

Солдаткин В.С., Вилисов А.А. Технология изготовления светодиодных кристаллов: Учебное пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2017. – 29с.

Настоящее учебное пособие составлено с учетом требований Федерального Государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) для магистров, обучающихся по направлению подготовки 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» содержит описание основных разделов лекционного курса дисциплины «Технология изготовления светодиодных кристаллов» и направлено на формирования у студентов следующих компетенций:

ОПК-5 – готовностью оформлять, представлять, докладывать и аргументированно защищать результаты выполненной работы;

ПК-4 – способностью планировать и проводить эксперименты, обрабатывать и анализировать их результаты.

ПСК-2 – готовностью разрабатывать технологическую документацию на проектируемые светотехнические устройства.

В результате изучения дисциплины студент должен:

Знать методы получения полупроводникового материала, методы формирования омических контактов и методы контроля параметров светодиодных кристаллов.

Уметь осуществлять контроль параметров светодиодных кристаллов.

Владеть навыками контроля параметров светодиодных кристаллов.

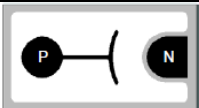
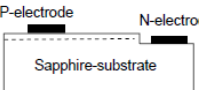

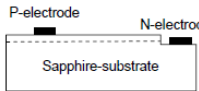

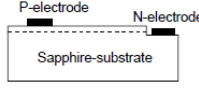
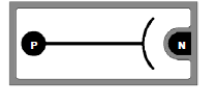
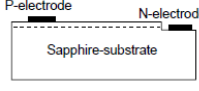
СОДЕРЖАНИЕ

1. Физические основы работы светодиода.....	4
1.1 Инжекция.....	6
1.2 Рекомбинация.....	9
1.3 Световывод.....	11
2. Основные характеристики СД.....	13
2.1 Электрические характеристики.....	13
2.2 Светотехнические характеристики.....	17
3. Основные технологические операции изготовления светодиодного кристалла.....	21
3.1 Эпитаксия гетероструктур.....	21
3.2 Очистка полупроводникового материала.....	24
3.3 Формирование омических контактов.....	26
Список литературы.....	27

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ СВЕДДИОДА

Разработчики Nichia Corporation в 2010 году изготовили высокоэффективный светодиодный кристалл размерами 450×450 мкм². При прямом токе 20 мА, прямое напряжение составляет 2,89 В, длина волны 444 нм, оптическая мощность 47,1 мВт. Таким образом КПД кристалла составило 81,3%. На основе этого кристалла изготовлен светодиод со световым потоком 14,4 лм, и цветовой температурой 4600К, световая отдача составила 249 лм/Вт [Narukawa Y., Ichikawa M., Sanga D., Sano M., Mukai T. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy // Journal of Physics: Applied Physics. – 2010. – № 43.].

Таблица 1. Разновидности светодиодных кристаллов планарного типа прямоугольной формы

	Epistar ES-CEBHJ08A	
Размер	205*318 (90)	
Ток	20	
Напряжение	2.8, 3.6	
Мощность излучения	15 (17)	
Длина волны	465 - 475	
Температура р-п перехода	115	
I _{пр. max}	30	
	ES-CEBHV08C	
Размер	220*660 (90)	
Ток	20	
Напряжение	2.8, 3.8	
Мощность излучения	23 (24.5)	
Длина волны	465 - 475	
Температура р-п перехода	115	
I _{пр. max}	30	
	ES-CEBHV10J	
Размер	250*460 (90)	
Ток	20	
Напряжение	2.8, 3.8	
Мощность излучения	21.5 (23)	
Длина волны	465 - 475	
Температура р-п перехода	115	
I _{пр. max}	30	
	ES-CEBHV10F	
Размер	260*585 (90)	
Ток	20	
Напряжение	2.8, 3.8	
Мощность излучения	24.5 (27)	
Длина волны	465 - 475	
Температура р-п перехода	115	
I _{пр. max}	30	
	ES-CEBHV20A	
Размер	510*970 (110)	


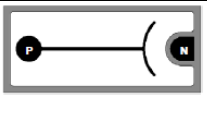
Ток	120	
Напряжение	3.3, 3.6	
Мощность излучения	65 (80)	
Длина волны	465 - 475	
Температура р-n перехода	115	
$I_{пр. max}$	150	
	ES-CEDBV10F	
Размер	260*5850 (90)	
Ток	20	
Напряжение	2.8, 3.8	
Мощность излучения	24.5 (27)	
Длина волны	445 - 455	
Температура р-n перехода	115	
$I_{пр. max}$	30	

Таблица 2. Разновидности светодиодных кристаллов вертикального типа квадратной формы

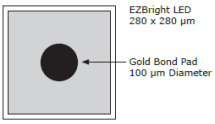
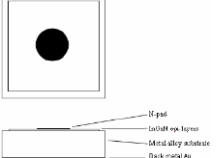
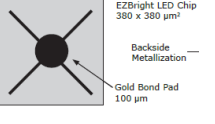
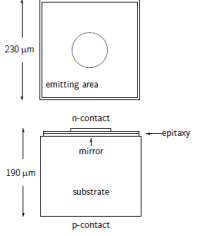
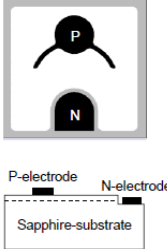
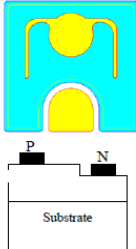
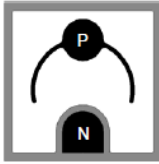
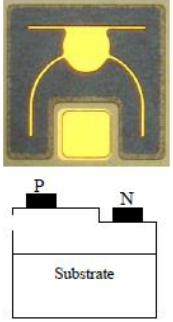
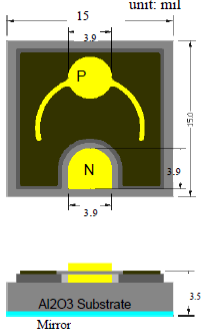
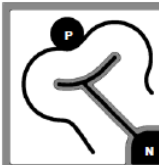

	Cree C460EZ290		SemiLeds SL-V-B15AA	
Размер	280 (100)		400 (80)	
Ток	20		20	
Напряжение	2.7, 3.2, 3.7		3.2, 3.5	
Мощность излучения	24		24 (35)	
Длина волны	455 - 465		450 - 475	
Температура р-n перехода	125	125		
$I_{пр. max}$	50	50		
	Cree C460EZ400		Light avenue (Osram) LA SB09WP2	
Размер	380 (100)		230 (90)	
Ток	150		10	
Напряжение	3.1, 3.5, 4.1		2.7, 3.5	
Мощность излучения	105 (120)		6.4 (10)	
Длина волны	445 - 465		455 - 465	
Температура р-n перехода	145	125		
$I_{пр. max}$	200	30		

Таблица 3. Разновидности светодиодных кристаллов планарного типа квадратной формы

	Epistar ES-CEBHV13		AOC-712BTBP-AU	
Размер	330 (100)		316 (100)	
Ток	20		20	
Напряжение	2.8, 3.6		2.8, 3.5	
Сила света	150 (180)		170 (270)	
Длина волны	465 - 475		445 - 475	
Температура р-n перехода	115			
$I_{пр. max}$	30			

	Epistar ES-CEBHV15		АОС-513ВТВ-АВ	
Размер	380 (100)		330 (100)	
Ток	20		20	
Напряжение	2.8, 3.8		2.8, 3.8	
Сила света	125 (220)		150 (230)	
Длина волны	465 - 475		445 - 465	
Температура р-n перехода	115			
$I_{пр. max}$	30			
	ES-CEBLV15A-M			
Размер	381 (100)			
Ток	20			
Напряжение	2.8, 3.8			
Сила света	150 (200)			
Длина волны	455 - 465			
Температура р-n перехода	115			
$I_{пр. max}$	30			
	ES-CABHV18		EpiValley B1818SM	
Размер	460 (150)		460	
Ток	60		60	
Напряжение	3.4, 3.8		3.5	
Мощность излучения	45 (55)		40 (45)	
Длина волны	465 - 475		450 - 462.5	
Температура р-n перехода	115			
$I_{пр. max}$	80		150	
	ES-CEBHV20		EpiValley B2020SM	
Размер	510 (110)		520	
Ток	60		60	
Напряжение	3.0, 3.6		3.5	
Мощность излучения	35 (40)		40 (45)	
Длина волны	465 - 475		450 - 462.5	
Температура р-n перехода	115			
$I_{пр. max}$	100		150	

1.1 Инжекция

Работа светодиода основана на явлении электролюминесценции – излучение фотонов твёрдым телом под воздействием электрического тока. Зонная структура является моделью для изучения свойств твёрдого тела. Твёрдое тело может быть металлом, диэлектриком или полупроводником в зависимости от ширины запрещённой зоны. В полупроводнике ширина запрещённой зоны, как правило, не превышает 3 эВ, а концентрация

электронов или дырок в соответствующих зонах обычно не превышает 10^{20} см^{-3} .

Полупроводниковый материал для светодиода синего и белого (синий цвет свечения кристалла плюс люминофор) цвета свечения представляет собой гетероэпитаксиальную структуру GaN/InGaN с множественными квантовыми ямами (МКЯ).

Когда образуется *p-n* переход, носители зарядов в его окрестности распределяются так, чтобы выровнять уровень Ферми. В области контакта слоев *n* и *p*-типов образуется дипольный слой, состоящий из ионизованных положительных доноров на *n*-стороне и ионизованных отрицательных акцепторов на *p*-стороне. Электрическое поле дипольного слоя создаёт потенциальный барьер, препятствующий дальнейшей диффузии электрических зарядов. При подаче на *p-n*-переход электрического смещения в прямом направлении потенциальный барьер понижается, вследствие чего в *p*-область войдет добавочное количество электронов, а в *n*-область *p*-дырок. Такое введение неосновных носителей заряда называется инжекцией. Концентрация инжектированных носителей заряда зависит только от равновесной концентрации неосновных носителей и приложенного напряжения.

Одной из проблем является формирование омического контакта к *p*-типу GaN. Существующие технологии формирования *p*-контакта позволяют получать контакты с удельным сопротивлением от 5×10^{-4} до 2×10^{-3} , это на один порядок хуже, чем для контактов к *n*-типу GaN. Основными проблемами для контактов к *p*-типу являются:

- высокая энергия активации акцепторной примеси (Mg – 160 эВ),
- тенденция поверхности GaN к формированию вакансий азота.

Указанные проблемы приводят к увеличению высоты барьера Шотки и повышают сопротивление СД. Повышение сопротивления приводит к увеличению напряжения на структуре, перегреву омических контактов, потере мощности излучения, а так же может привести к выходу из строя СД.

Для светодиодов характерен эффект стягивания тока («current crowding») под омическими контактами, который также оказывает негативное влияние на надёжность и срок службы СД.

Помимо металлизации золото-никель в качестве омических контактов применяют полупрозрачные контакты на основе *ИТО* (indium tin oxide), такие контакты позволяют увеличить вывод излучения из кристалла, но создают дополнительное сопротивление на омических контактах.

Таким образом, падение напряжения на современном СД составляет от 2.9 до 3.5 В. Характеристиками эффективности работы кристалла СД являются внешний квантовый выход и КПД. Внешний квантовый выход (характеризует кристалл):

$$n_{ext} = (P / (hv)) / (I/e) = n_{int} \times n_{extract}, \quad (1)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) светодиода:

$$n_{power} = P / (I \times U), \quad (2)$$

где P – мощность оптического излучения вышедшего за пределы светодиода, $(I \times U)$ – потребляемая электрическая мощность (прямой постоянный ток, помноженный на прямое постоянное напряжение).

На сегодняшний день КПД кристалла СД составляет на промышленных образцах ~ 50%, а на лабораторных ~ 80%.

1.2 Рекомбинация

Излучательная рекомбинация – единственный физический механизм генерации света в светоизлучающих диодах. Виды рекомбинации:

1. Межзонная рекомбинация, при которой электрон из зоны проводимости переходит в валентную зону на место дырки непосредственно, излучая энергию, несколько большую ширины запрещенной зоны.

2. Рекомбинация свободных носителей заряда на примесных центрах: электрон – акцептор или дырка – донор, при которой носители захватываются примесными центрами, а затем рекомбинируют со свободным носителем противоположного знака.

3. Межпримесная, или донорно – акцепторная, рекомбинация, при которой носители захватываются примесными центрами, а затем электрон переходит с донора на акцептор в процессе акта излучательной рекомбинации; для такого перехода необходимо частичное перекрытие волновых функций электрона и дырки.

4. Рекомбинация связанных экситонов, при которой примесный центр захватывает электрон и дырку, так что возбуждение целиком локализуется вблизи центра, после чего осуществляется излучательная рекомбинация.

5. Экситонная рекомбинация, при которой электрон и дырка перед актом излучения связываются в свободный экситон, освободив часть энергии, равную энергии связи экситона.

Повышение уровня легирования активной области повышает вероятность излучательной рекомбинации. Однако приближение уровня легирования к пределу растворимости примеси приводит к возникновению структурных дефектов, образующих безызлучательные центры рекомбинации. В связи с этим, оптимальный уровень легирования активной области подбирают экспериментально.

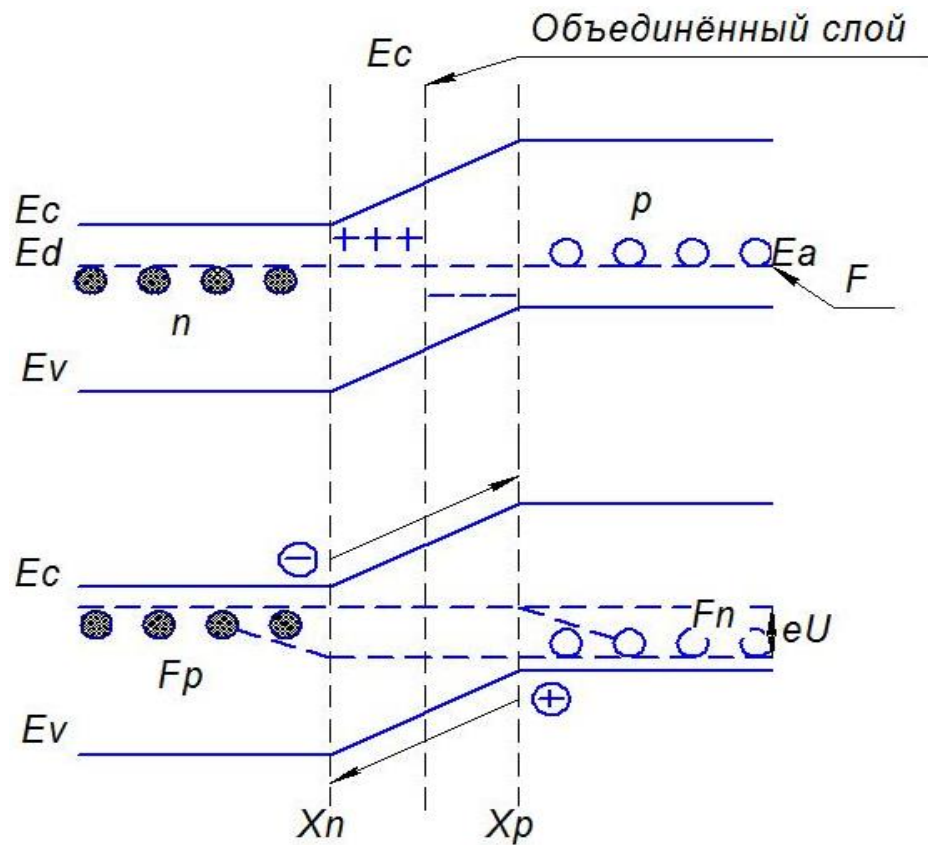


Рисунок 1. Схематическое изображение зонной диаграммы p - n перехода

Внутренний квантовый выход гетероструктуры в современных СД близок к единице. Внутренний квантовый выход светодиода:

$$n_{int} = (P_{int} / (h\nu)) / (I/e), \quad (3)$$

где P_{int} – мощность оптического излучения, генерируемого в активной области светодиода,

I – ток инжекции.

1.3 Световывод

Из кристалла СД может быть выведена лишь часть сгенерированного излучения. Коэффициент оптического вывода излучения, вышедшего за пределы кристалла СД (является характеристикой кристалла и просветляющего покрытия):

$$n_{extract} = (P / (h\nu)) / (P_{int} / (h\nu)), \quad (4)$$

где P – мощность оптического излучения вышедшего за пределы кристалла;

P_{int} – мощность оптического излучения сгенерированного в активной области кристалла.

При падении светового потока на поверхность какого-либо тела часть этого светового потока отражается (коэффициент отражения ρ), часть рассеивается (коэффициент рассеивания σ), часть поглощается (коэффициент поглощения α) и часть проходит насквозь (коэффициент пропускания τ). Как правило, коэффициент рассеивания и коэффициент поглощения объединяют в коэффициент поглощения

Соответственно:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (5)$$

$$\rho = (n - 1)^2 / (n + 1)^2 \quad (6)$$

где n – показатель преломления.

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (7)$$

где I_0 – интенсивность падающего света;

I – интенсивность света, прошедшего через толщину x .

Основные потери при выводе излучения:

1. Потери на поглощение в материале кристалла.
2. Френелевские потери.
3. Потери за счёт полного внутреннего отражения от границы раздела сред с различающимися показателями преломления, определяемые так называемым критическим углом.

Часть сгенерированных фотонов поглощается материалом кристалла, омическими контактами и подложкой полупроводника.

При распространении света из среды с показателем преломления n_1 в среду с показателем преломления n_2 часть света отражается обратно от границы раздела. Эти потери света называются френелевскими.

Потери, связанные с критическим углом. Этот вид потерь, приводящих к значительному уменьшению эффективности, обусловлен полным внутренним отражением фотонов, падающих на поверхность кристалла под углами, большими критического. Световой луч, проходя из глубины кристалла к внешней поверхности, отражается в соответствии с законом Снелля:

$$n_1 \sin \varphi = n_2 \sin \Phi, \quad (8)$$

где φ , Φ – угол падения и угол преломления;

n_1 , n_2 — показатели преломления первой среды и второй среды, соответственно.

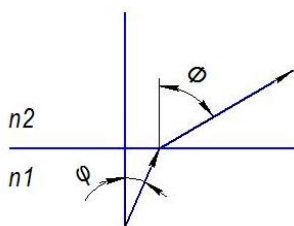


Рисунок 2. Влияние оптического покрытия на эффективность вывода излучения

Угол падения φ , при котором угол преломления Φ составляет 90° , называется критическим углом $\varphi_{кр}$:

$$\varphi_{кр} = \arcsin(n_2 / n_1), \quad (9)$$

$$P_{внутр} / P_{внеш} = (1/2) \times (1 - \cos \varphi_{кр}), \quad (10)$$

где $P_{внутр}$ – мощность излучения генерируемая внутри полупроводника, $P_{внеш}$ – доля оптической мощности вышедшей из полупроводника.

$$P_{внеш} / P_{внутр} = (1/4) \times (n_2^2 / n_1^2). \quad (11)$$

Так критический угол для GaN составляет 23,6 град., а доля вышедшего излучения в воздух 4,18%.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СД

2.1 Электрические характеристики

К электрическим характеристикам СД относятся прямое и обратное напряжения и прямой и обратный ток. СД работает при постоянном токе, все зависимости физических величин измеряются в зависимости от значения постоянного тока.

Известно, что повышенная температура активной области кристалла крайне негативно воздействует на СД. Снижает его срок службы, приводит к катастрофическим отказам, усиливает деградацию и изменяет основные параметры (напряжение, световой поток и спектр излучения) в процессе эксплуатации. Помимо температуры окружающей среды, активная область кристалла СД выделяет тепло. Если рассмотреть современный промышленный СД, то потребляемая мощность (к примеру, один Ватт) поступает на кристалл (КПД кристалла 50%), из неё 50% мощности излучается в виде фотонов, а 50% в виде фононов.

В кристалле основное тепловыделение происходит в активной области. Кроме того, известно существование эффекта стягивания тока, вследствие которого основной нагрев происходит под омическими контактами. Причём, чем выше ток, тем больше нагрев под контактами. Исходя из этого, для надёжной эксплуатации СД необходимо выбирать режимы эксплуатации. Для снижения влияния эффекта стягивания тока производители применяют достаточно сложную топологию омических контактов (рис. 3).

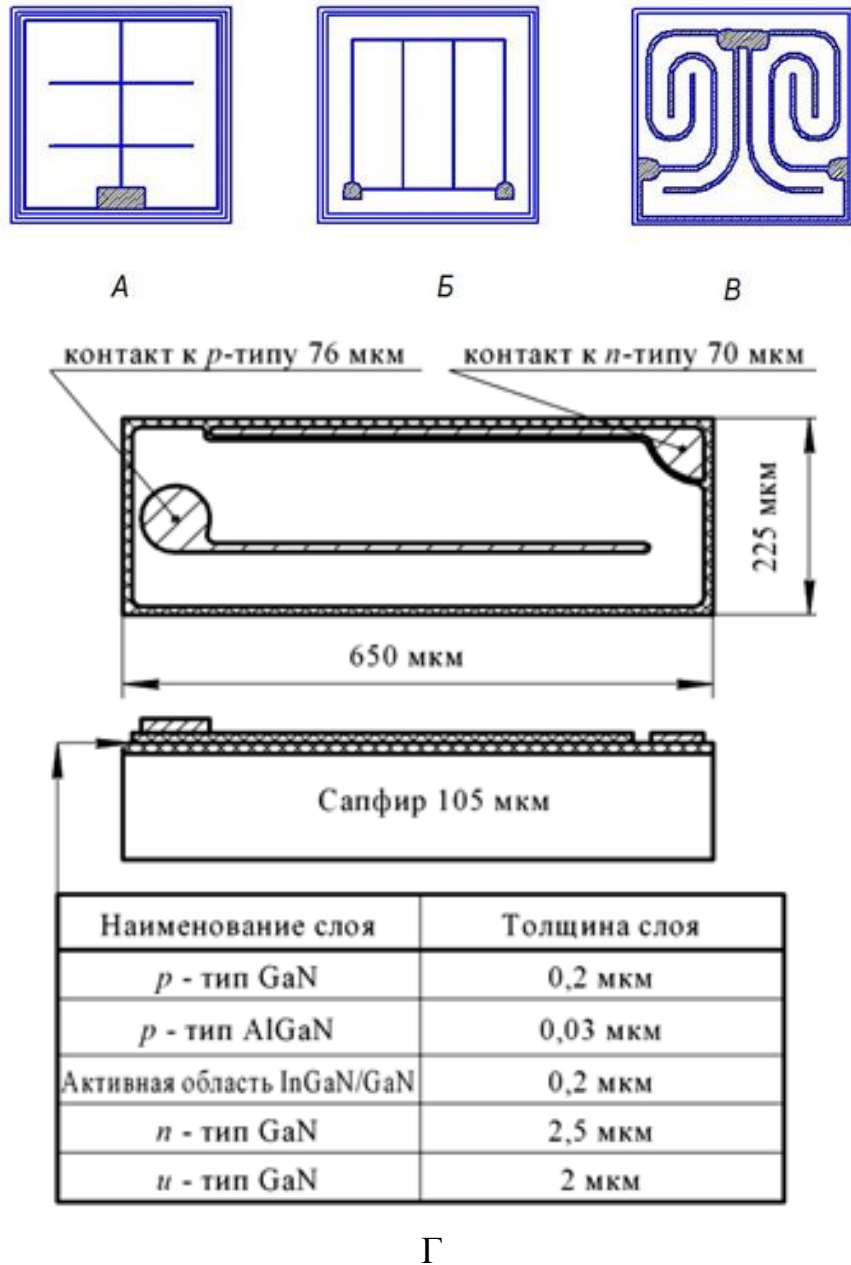


Рисунок 3. Типы топологии омических контактов кристаллов:

А – SemiLEDs, Б – Cree, В – Epistar, Г – Epistar

Для СД основе двойных гетероструктур GaN/InGaIn зависимость прямого напряжения от температуры светодиода

$$dU / dT = - (1,76 - 2,3) \text{ мкВ/К}, \quad (12)$$

Температурная зависимость ширины запрещённой зоны описывается по формуле:

$$E = E|_{T=0\text{K}} - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (12)$$

где α и β – эмпирически подобранные коэффициенты: $\alpha = 7,7 \times 10^{-4}$ эВ, $\beta = 600$ К. $E|_{T=0\text{K}}$ – ширина запрещённой зоны при 0 К, 3,47 эВ.

Графически зависимость максимума длины волны излучения кристалла СД от температуры можно представить в линейном виде (рис. 4).

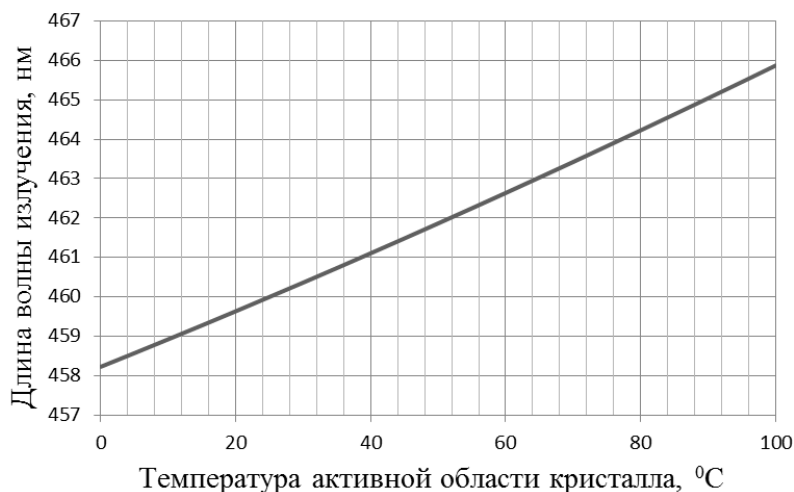


Рисунок 4. Зависимость длины волны излучения кристалла от температуры

Как видно из рис. 4, изменение максимума интенсивности излучения кристалла СД в оптическом спектре в диапазоне длин волн в зависимости от температуры активной области кристалла в диапазоне от 0°С до 100°С может достигать 10 нм. Изменение длины волны излучения кристалла СД приведёт к изменению цветовых координат белого свечения СД. Также может существенно снизить световую отдачу СД в связи с появлением рассогласованности спектра излучения кристалла и спектра возбуждения люминофора.

Зависимость мощности излучения СД от температуры

$$P = P|_{300\text{K}} \exp \frac{T-300\text{K}}{T_i}, \quad (13)$$

T_i – характеристическая температура конкретного светодиода.

Графически зависимость относительного потока излучения кристалла СД от температуры можно представить в линейном виде (рис. 5).

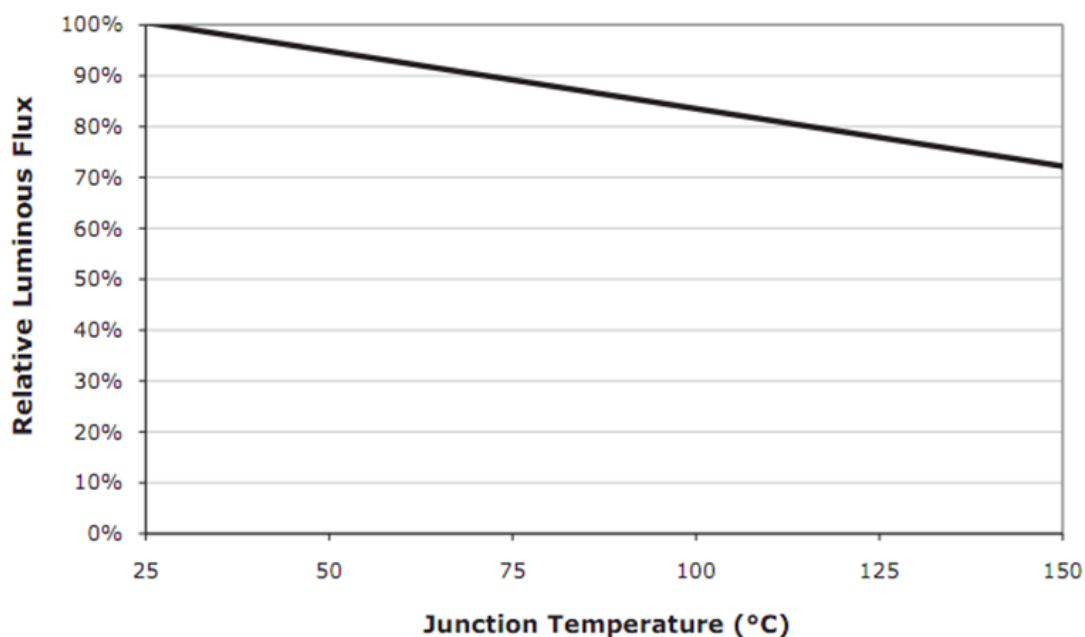


Рисунок 5. Зависимость относительного потока излучения кристалла СД от температуры активной области

Критерием, определяющим способность конструкции СД отводить тепло от активной области кристалла, является тепловое сопротивление. Можно представить тепловое сопротивление СД как сумму последовательных тепловых сопротивлений активной области кристалла, *p*- и *n*- слоёв, подложки кристалла, омических контактов, клея для монтажа кристалла в корпус, корпуса, компаунда с люминофором. Т.к. компаунд имеет очень низкую теплопроводность по сравнению с другими элементами (не более 0,1 Вт/м×К), считают, что всё тепло отводится через подложку кристалла, клей и корпус СД. Для каждого слоя приближённо:

$$R_t = \delta / (\lambda \times S), \quad (14)$$

где, δ – толщина слоя (м);

S – площадь слоя (м²);

λ – теплопроводность вещества.

Данная формула является вполне приемлемой для проведения расчётов и моделирования.

Для практических измерений используют формулу:

$$P_e = (T_1 - T_2) / R_t, \quad (15)$$

где 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).

Для измерения теплового сопротивления полупроводника существуют четыре метода. Для измерения теплового сопротивления СД применяют два метода. Первый заключается в подаче на СД импульсного греющего тока, а затем по изменению напряжения при малом токе вычисляют температурный коэффициент напряжения, определяют тепловое сопротивление. Второй метод заключается в нагреве СД с помощью внешнего источника и определении его температуры активной области.

Тепловое сопротивление современных промышленных образцов СД достигает 6 К/Вт. Конструкция СД для поверхностного монтажа позволяет существенно снизить тепловое сопротивление при монтаже СД на печатную плату. Но наиболее важную роль играет в снижении теплового сопротивления материал подложки кристалла.

2.2 Светотехнические характеристики

В таблице 4 приведены характеристики, значения которых характеризуют СД.

Таблица 4. Энергетические величины

Наименование	Символ	Единица измерения		
		Россия	Система СИ	Квантовый аналог
Поток излучения	Φ_e	Вт	W	N_{ph}/s (кол-во фотонов в секунду)
Энергия излучения	Q_e	Дж	J	N_{ph} (кол-во фотонов)
Энергетическая сила излучения (сила излучения)	I_e	Вт/ср	W/sr	$N_{ph}/sr \cdot s$ (кол-во фотонов в телесном угле 1ср в секунду)
Поверхностная плотность потока излучения	M_e	Вт/м ²	W/m^2	$N_{ph}/m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов излучаемых с 1м ² в секунду)

Энергетическая освещенность (облученность)	E_e	Вт/м ²	W/m ²	$N_{ph}/m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов на 1 м ² в секунду)
Энергетическая яркость	L_e	Вт/ср*м ²	W/sr*m ²	$N_{ph}/sr \cdot m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов в телесном угле в 1ср на 1 м ² в секунду)

Мощность излучения или *поток излучения* это величина энергии, переносимой полем в единицу времени через известную площадь

$$\Phi_e (P_e) = dQ_e/dt \quad (16)$$

где Φ_e – поток излучения (Вт), P_e – мощность излучения (Вт);

Q_e – энергия излучения (Дж);

t – время (с).

Сила излучения – поток излучения, приходящийся на единицу телесного угла в котором он распространяется.

$$I_e = \Phi_e/\Omega \quad (17)$$

где I_e – сила излучения (Вт/ср);

Φ_e – поток излучения (Вт);

Ω - телесный угол (ср).

Телесный угол расположен в конусе с вершиной в центре сферы (место расположения источника излучения) и равен отношению площади, вырезанной в сфере этим конусом к квадрату радиуса сферы, измеряется в стерадианах.

$$\Omega = S/r^2 \quad (18)$$

где Ω – телесный угол (ср),

S – площадь основания конуса ограниченного сферой в которой распространяется излучение,

r – радиус сферы в которой распространяется излучение.

Поверхностная плотность потока излучения – поток излучения, проходящий через единицу поверхности по всевозможным направлениям в пределах полусферического телесного угла.

Если площадка освещается потоком, то поверхностная плотность потока энергии будет иметь смысл энергетической освещенности или облученности:

$$E_e = d\Phi_e/dS \quad (19)$$

где E_e – энергетической освещенности или облученности (Вт/м²);

Φ_e – поток излучения (Вт);

S – единица площади (м²).

Если поток излучается площадкой, то поверхностная плотность потока энергии будет иметь смысл энергетической светимости:

$$E_e = d\Phi_e/dS \quad (20)$$

где M_e – энергетической освещенности или облученности (Вт/м²);

Φ_e – поток излучения (Вт);

S – площадь поверхности источника (м²).

Энергетическая яркость – величина потока, излучаемого единицей площади в единицу телесного угла в данном направлении:

$$L_e = d^2\Phi_e/d\Omega dS \cos\Theta \quad (21)$$

где L_e – энергетическая яркость (Вт/ср·м²);

Φ_e – поток излучения (Вт);

S – площадь поверхности источника (м²);

Θ – угол между направлением излучения и нормалью к площадке.

Свет – электромагнитное излучение, воспринимаемое человеческим глазом (380 – 780) нм.

Переход от энергетических величин к световым осуществляется по формуле (22):

$$\Phi(\text{Лм}) = 683(\text{Лм/Вт}) \times K \times P(\text{Вт}) \quad (22)$$

где, K – уровень спектральной световой чувствительности для данной длины волны излучения

Таблица 5. Фотопическая функция человеческого глаза

λ , нм	K	λ , нм	K	λ , нм	K	λ , нм	K
380	0,00004	480	0,139	580	0,870	690	0,0082

390	0,00012	490	0,208	590	0,757	700	0,0041
400	0,00040	500	0,323	600	0,631	710	0,0021
410	0,0012	510	0,503	610	0,503	720	0,00105
420	0,0040	520	0,710	620	0,381	730	0,00052
430	0,0116	530	0,862	630	0,265	740	0,00025
440	0,023	540	0,954	640	0,175	750	0,00012
450	0,038	550	0,995	650	0,107	760	0,00006
460	0,060	555	1,0000	660	0,061	770	0,00003
470	0,091	560	0,995	670	0,032		
		570	0,952	680	0,017		

Световые величины являются аналогами энергетических с учётом фотопической функции человеческого глаза.

Таблица 6. Световые величины

Наименование	Символ	Единица измерения	
		Россия	Система СИ
Световой поток	Φ_v	лм	lm
Световая энергия	Q_v	лм*с	$lm*s$
Сила света	I_v	лм/ср =кд	$lm/sr=cd$
Поверхностная плотность светового потока	M_v	лм/м ²	lm/m^2
Освещенность	E_v	лк	$lm/m^2 = lx$
Яркость	L_v	лм/ср*м ² = кд/м ² = нит	$lm/sr*m^2 = cd/m^2$ = nit

3. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНОГО КРИСТАЛЛА

3.1 Эпитаксия гетероструктур

Арсенид галлия (GaAs, AlGaAs) полупроводниковый материал $A^{III}B^V$ предназначен для изготовления инфракрасных диодов и красных светодиодов. Ширина запрещённой зоны порядка 1,5 эВ, напряжение питания от 1,5 до 2,0 В. Диапазон оптического пропускания от 1 до 11 мкм. Показатель преломления при длине волны 800 нм 3,34. Теплопроводность 55 Вт/(м·К). Полупроводниковые гетероструктуры GaAs/AlGaAs преимущественно изготавливают методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Арсенид галлия и его соединения применяются для изготовления инфракрасных диодов, красных светодиодов, диодов с барьером Шоттки, диодисторов, управляемых тиристоров, фототиристоров, гипербыстрых диодов, сверхвысоковольтных мощных СВЧ-транзисторов, мощных драйверов и контроллеров для ВЧ-переключателей, и для фотоэлементов.

Фосфид галлия (GaP, GaAsP, AlGaInP) полупроводниковый материал $A^{III}B^V$ предназначен для изготовления красного, жёлтого и зелёного светодиодов. Ширина запрещённой зоны порядка 2,3 эВ, напряжение питания 1,5 до 2,0 В. Показатель преломления 3,4. Полупроводниковые гетероструктуры GaP, GaAsP, AlGaInP преимущественно изготавливают методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Нитрид галлия (GaN, InGaN, AlGaN) полупроводниковый материал $A^{III}B^V$ предназначен для изготовления зелёных, синих, ультрафиолетовых и белых светодиодов. Ширина запрещённой зоны порядка 3,4 эВ, напряжение питания от 2,5 до 3,5 В. Теплопроводность 130 Вт/(м·К). Показатель преломления 2,29. Помимо светодиодов, нитрид галлия и его соединения применяются в солнечных батареях, усилителях мощности СВЧ,

транзисторах.

GaN, InGaN, AlGaN изготавливают методом газовой фазной эпитаксии (её разновидность МОС-гидридная эпитаксия или MOCVD), данный метод основан на подаче в ростовую зону исходных компонентов: In, Al, Ga, N в виде легколетучих простых веществ или соединений в потоке газа-носителя.

Одной из проблем является формирование омического контакта к *p*-типу GaN. Существующие технологии формирования *p*-контакта позволяют получать контакты с удельным сопротивлением от 5×10^{-4} до 2×10^{-3} , это на один порядок хуже, чем для контактов к *n*-типу GaN. Основными проблемами для контактов к *p*-типу являются:

- высокая энергия активации акцепторной примеси (Mg – 160 эВ),
- тенденция поверхности GaN к формированию вакансий азота.

Указанные проблемы приводят к увеличению высоты барьера Шотки и повышают сопротивление СД. Повышение сопротивления приводит к увеличению напряжения на структуре, перегреву омических контактов, потере мощности излучения, а так же может привести к выходу из строя СД.

Молекулярная пучковая эпитаксия МПЭ (Molecular-Beam Epitaxy - MBE). Метод эпитаксиального выращивания полупроводникового материала в условиях вакуума до 10–8Па, при котором атомарные или молекулярные пучки направляют на нагретую подложку из монокристаллического материала. Температура подложки составляет порядка 500-700 °С. Материалы эпитаксиальных слоёв помещаются в специальные кварцевые сосуды. Подложка помещается на определённом расстоянии между сосудами (до 0,5 м). Материалы в сосудах нагревают до высоких температур, вследствие чего они начинают испаряться. В вакууме при определённой конструкции камеры большая вероятность столкновения частиц испарённых материалов, а нагретая подложка способствует эффективной диффузии материалов. Данный метод позволяет получать полупроводниковые гетероструктуры высокой чистоты, но при этом сам технологический процесс является сложным и дорогостоящим, и полупроводниковый материал имеет низкую скорость

роста.

Газофазная эпитаксия из металло-органических соединений ГФЭ (MetalOrganics Compound Vapor Deposition - MOCVD). Метод эпитаксиального выращивания полупроводникового материала на монокристаллическую подложку осуществляется при низком давлении из металлоорганических соединений в специальном реакторе. Реакторы бывают вертикального и горизонтального типа.

Примерные требования к нитридной эпитаксиальной гетероструктуре на сапфировой подложке

Таблица 7. Примерные требования к нитридной эпитаксиальной гетероструктуре на сапфировой подложке

Структура слоёв	Толщина, мкм	Концентрация, см ⁻³
p-GaN (легирован магнием Mg)	0,15	$1 \cdot 10^{17}$
p-AlGaN	0,01	
InGaN/GaN (активная область)	0,1	
n-GaN (легирован кремнием Si)	4,5	$1 \cdot 10^{18}$
Сапфировая подложка (Al ₂ O ₃)	430±25	

Длина волны излучения 460±3 нм; внутренний квантовый выход ~ 80%; плотность дислокаций ~10⁸/см³; активация примеси магния в p-слое; текстурирование поверхности сапфировой подложки; кривая качания рентгеновской дифракции: <300 arc sec.

Характеристики технологического процесса MOCVD:

$P_{tot} = 200 \text{ mbar}$, $T_D = 750...1100 \text{ }^\circ\text{C}$, TMGa, TEGa, TMIIn, NH₃, Carrier gas N₂ during MQW, Carrier gas H₂ during GaN.

3.2 Очистка полупроводникового материала

Чистым веществом называют физически и химически однородное простое тело или химическое соединение, состоящее из одного определенного вида атомов, ионов или молекул и обладающее только ему присущим комплексом постоянных свойств.

Абсолютно чистым веществом можно назвать вещество, не имеющее физических и химических дефектов, т.е. не содержащее посторонних примесей и имеющее совершенную структуру.

Сорбционными в общем случае называют процессы, в которых поглощение вещества происходит на границе двух фаз: жидкой и газообразной, твердой и газообразной, твердой и жидкой.

Ионный обмен- это обратимый взаимообмен ионов с одноименными зарядами, протекающий между раствором и твердым нерастворимым веществом, находящимся в контакте с этим раствором.

Экстракция представляет собой процесс избирательного извлечения веществ в жидкую фазу.

Кристаллизационные методы очистки основаны на различии в растворимости примеси в жидкой и твердой фазах очищаемого вещества.

Сублимация, или возгонка,- простейший процесс испарения – конденсации, представляет собой процесс испарения вещества путем непосредственного перехода его из твердого состояния в парообразное.

Дистилляция, или перегонка, - это процесс испарения жидкости, позволяющий осуществить разделение раствора или расплава на его составные части, характеризующиеся различным давлением паров.

Электролитический метод разделения и очистки в основном применим к технологии получения чистых металлов.

Метод предварительного электролиза реализуется в потоке электролита при минимальной скорости потока, максимально возможной поверхности катода и на минимальной плотности тока, чтобы не обеднять электролит ионами основного металла.

Цементация представляет собой вытеснение из раствора ионов одного металла ионами другого, более электроотрицательного.

Электролитическое рафинирование, основано на использовании для очистки металлов анодного процесса совместного образования катионов.

Методы разделения диффузией и термодиффузией основаны на использовании различия в скоростях диффузии газов через пористые металлические перегородки, а также на различии состава газовой смеси в холодной и нагретой частях специальной разделительной колонны.

Обезжиривание – очистка поверхности от органических загрязнений растворителями, составляет замещение сорбированных агломеров или молекул примесей молекулами растворителей.

Ультразвуковая обработка – образование мощных гидродинамических воздействий на поверхность обрабатываемой детали вследствие явления кавитации.

3.3 Формирование омических контактов

Создание омических контактов к *n*- области диода не представляет значительных трудностей. Формирование же омических контактов к *p*-GaN с низким удельным сопротивлением и высокой прозрачностью в рабочей области спектра – достаточно сложная задача из-за отсутствия металла с высокой работой выхода и из-за ограничений в легировании *p*- области. Несмотря на то, что предельная растворимость Mg в GaN составляет $\approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, концентрация носителей заряда в поверхностном слое GaN обычно на два порядка ниже. Кроме того, к снижению концентрации носителей заряда может приводить остаточный водород, накапливающийся в поверхностном слое *p*-GaN в процессе эпитаксиального выращивания. В результате этого концентрация свободных носителей в поверхностном слое ниже, чем в объеме.

Для получения воспроизводимых омических контактов с требуемыми характеристиками исследовано множество схем металлизации. Были исследованы такие металлы как Au, Ni, Ti, Pd, Pt, Au/Ni, Au/Pt, Au/Cr, Au/Pd, Au/Mg/Au, Au/Pt/Pd, Au/Cr/Ni, Au/Pt/Ni, Au/Ni/Pt и др. Наиболее широко для омических контактов к *p*-GaN используется система Au/Ni, причем не только в светоизлучающих диодах, но и в экспериментальных образцах лазерных диодов, в которых требования к омическим контактам еще более жесткие. Удельное контактное сопротивление для многих контактных систем обычно находится в пределах $2,1 \cdot 10^{-2} - 9,6 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. При этом следует отметить, что результаты исследований омических контактов к *p*-GaN, часто весьма противоречивы. Расхождение в полученных результатах могут быть связаны с различиями в условиях эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках / пер с англ. Ж. Панков; под ред. Ж.И. Алфёрова и В.С. Вавилова – М.: Мир, 1973. – 456 с.
4. Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
5. Берг А., Дин П. Светодиоды // Пер с англ. А. Э. Юнович. – М.: Мир, 1979. –687 с.
6. Социн Н.П. Новые люминофоры для эффективных приборов твердотельного освещения. Круглый стол производство светодиодов в россии – дорожная карта. Материалы доклада. Москва 2011. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nprpss.ru/sobytiya/vystavki-i-konferencii/kruglyj-stol-proizvodstvo-svetodiodov-v-rossii-dorozhnaya-karta.html>, свободный (дата обращения: 08.04.2013).
7. Шмидт Н.М., Аверкиев Н.С., Бауман Д.А., Закгейм А.Л., Левинштейн М.Е., Петров П.В., Черняков А.Е., Шабунина Е.И. Причины неоднозначного развития деградационного процесса в синих InGaN/GaN светодиодах // 8-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» . – 2011. – С. 109-110.
8. ОСТ11-336.938-83 Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность. – 1983.
9. РД II 0216-85. Приборы полупроводниковые. Методы испытаний по определению конструкторско-технологического запаса.
10. Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 20 июля 2011 г. N 602 г. Москва «Об утверждении требований к осветительным устройствам и электрическим лампам, используемым в цепях

переменного тока в целях освещения».

11. Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 2446-р.

12. ГОСТ 27299-87 Приборы полупроводниковые оптоэлектронные. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.

13. ГОСТ 7601-78 Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин.

14. Крутик М.И., Майоров В.П. Люмены, канделы, ватты и фотоны. Различные единицы - различные результаты измерения чувствительности телевизионных камер на основе ЭОП и ПЗС // Специальная техника. – 2002. – №5.

15. ГОСТ 18986.3-73 Приборы полупроводниковые. Метод измерения постоянного прямого напряжения и постоянного прямого тока. – 1973. – 3 стр.

16. ПР 50.2.006 Правила по метрологии. Порядок проведения поверки СИ. – 1994. – 10 стр.

17. ГОСТ 20.57.406 – 81 Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. – 1981. – 132 стр.

18. ГОСТ 25024.4-85 Индикаторы знаковосинтезирующие. Методы измерения яркости, силы света, неравномерности яркости и неравномерности силы света. – 1985. – 33 стр.

19. ГОСТ 8.332 - 78 Государственная система обеспечения единства измерений. Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения. – 1978. – 8 стр.

20. ГОСТ 20.57.406 – 81 Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. – 1981. – 132 стр.

21. ГОСТ 19834.3-76. Излучатели полупроводниковые. Метод измерения распределения энергии излучения и ширины спектра излучения. –

1976. – 7 стр.

22. Энергоэффективное электрическое освещение: учебное пособие / С.М. Гвоздев, Д.И. Панфилов, Т.К. Романова и др.; под. ред. Л.П. Варфоломеева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 288 стр.

23. Мешков В.В. Основы светотехники, ч.1 – М.: Энергия, 1979.

24. Мешков В.В., Матвеев А.Б, Основы светотехники, Ч-2. – М.: Энергоатомиздат, 1989

25. В.Е. Бугров, К.А. Виноградова. Оптоэлектроника светодиодов. Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 174 с.

26. Солдаткин В.С. Модернизация и исследование характеристик светодиода белого свечения для поверхностного монтажа. Автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.11.07 / гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники (ТУСУР) РАН. Томск, 2013

27. Полупроводниковая светотехника: Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки 211000.62 – Конструирование и технология электронных средств / Туев В.И., Солдаткин В.С., Вилисов А.А. – 2015. 46 с.