

Н. Я. СТРУХЛЯК, д. ф.-м. н. Д. М. ЗАЯЧУК,
к. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ, к. т. н. В. И. БОСЫЙ

Украина, г. Львов, НУ «Львовская политехника»,
НПП «Карат»; г. Киев, НПП «Сатурн»
E-mail: nata@carat.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
10.02 2006 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ БЕЛОГО СВЕТА: СОСТОЯНИЕ И ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Проведен обзор состояния и тенденций развития технологии изготовления светоизлучающих диодов белого света. Систематизированы параметры сверхъярких белых светодиодов, светодиодных модулей и источников света.

Электролюминесценцию неорганических кристаллов впервые наблюдал Х. Д. Раунд еще в 1907 г. [1]. Первые полупроводниковые светодиоды (СД) на карбиде кремния были открыты в 1923 г. О. В. Лосевым и в 1939 г. им же дано теоретическое объяснение появления свечения при пропускании тока через $p-n$ -переход [2]. В 1955 г. Р. Браунштейн наблюдал рекомбинационное излучение в арсениде галлия, вызванное рекомбинацией через примесные центры [3]. В 1962 г. группа ученых во главе с Д. Н. Наследовым впервые наблюдала рекомбинационное излучение в арсениде галлия, которое соответствует переходам, энергетически близким к междузонным [3]. Массовое производство красных СД на основе материалов A^3B^5 , таких как GaAs и GaAsP, начала американская компания „Дженерал Электрик” в 1962 г. [1]. В дальнейшем важную роль в усовершенствовании светоизлучающих диодов сыграл метод жидкостной эпитаксии, разработанный в 1963 г. Д. Нельсоном применительно к арсениду галлия [3]. Исторически началом современного этапа развития источников света на основе полупроводниковой элементной базы можно считать конец 80-х годов прошлого столетия, когда на основе четверных систем InAlGaP материалов A^3B^5 были изготовлены сверхъяркие светодиоды красного, оранжевого и желтого излучения.

Поистине революционные изменения произошли в начале 90-х годов XX столетия, которые были связаны с изготовлением сверхъярких зеленых и голубых СД на основе нитридов индия (InN), галлия (GaN) и алюминия (AlN). Так, в декабре 1993 г. фирма Nichia Chemical Co. of Japan объявила об изготовлении сверхъярких высокоэффективных (3,8%) голубых (450 нм) СД на основе гетероструктур InGaN, которые обеспечивали мощность 1 мВт при токе 10 мА. Светоотдача этих диодов была в сто раз выше, чем светоотдача СД на карбиде кремния, промышленное производство которых было освоено в то время [4].

Несколько позже фирма Research Triangle Park изготовила сверхъяркие СД на основе InGaN-гетеро-

структур с использованием более дешевой подложки из карбида кремния [4]. Более дешевая и модернизированная технология изготовления чипа СД значительно снизила цену таких диодов. С этого времени стало возможным создание белого СД путем размещения в одном корпусе трех чипов (красного, зеленого и синего). Светоотдача сверхъярких диодов стала выше, чем светоотдача ламп накаливания. Это позволило поставить задачу разработки источников света на основе СД. Важность нового подхода к разработке источников света обусловлена высокой надежностью и большим временем эксплуатации СД, их экономичностью и возможностью подбора желаемого спектра излучения.

Данный обзор приурочен современным достижениям в области создания сверхъярких СД, особое внимание уделено сверхъярким СД белого света.

Основные мировые тенденции развития сверхъярких светоизлучающих диодов

Анализ тенденций развития электроники последних лет позволяет утверждать, что за последнее десятилетие XX века особенно заметным было интенсивное развитие одной из областей микроэлектроники — оптоэлектроники. Этот прогресс был в основном обусловлен значительным возрастанием объемов выпуска сверхъярких светоизлучающих диодов (high-brightness light emitting diodes, HBLEDs). Согласно [5], начиная с середины 1990-х годов объем продаж этих полупроводниковых приборов возрастал из года в год примерно на 40%.

Благодаря разработке новых эпитаксиальных технологий изготовления гетероструктур, в частности MOCVD (газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений), светоотдача светодиодов, изготовленных на основе AlInGaP, InGaN, GaN, значительно возросла [6]. В желто-красной области спектра она достигла значений 30—40 лм/Вт [7, 8], в сине-зеленой — 35 лм/Вт [9], а белых диодов — 20—25 лм/Вт [10]. Эти показатели значительно превышают светоотдачу ламп накаливания, которая равна 10—15 лм/Вт [11], что и позволило поставить задачу разработки осветителей на основе сверхъярких светоизлучающих диодов. Значительно шире СД стали использоваться в системах дополнительного освещения и художественной подсветки разных зданий, а также для отображения видеографической информации с помощью светодиодных дисплеев [12]. Предвидится, что в ближайшем буду-

Прогнозируемая временная карта развития сверхъярких светодиодов

Основные параметры	Годы			
	2002	2007 Замена ламп накаливания	2012 Замена люми- несцентных ламп	2020
Светоотдача СД, лм/Вт	25	50	150	200
Светоотдача источников света на основе СД, лм/Вт	20	200	1000	1500
Стоимость одного люмена, \$/лм	0,50	0,050	<0,015	<0,005

щем, благодаря усовершенствованию технологии изготовления гетероструктур и СД на их основе, светоотдача светодиодов возрастет до 150 лм/Вт. Ожидаемое увеличение по годам основных параметров сверхъярких СД и источников света на их основе, согласно оценкам [5], приведено в **табл. 1**.

Особенно привлекают внимание две важные вехи в развитии источников света. Первая из них прогнозируется в 2007 г., когда стоимость одного люмена снизится до 0,050 \$/лм благодаря удешевлению технологии изготовления и, главное, из-за существенного улучшения параметров СД. Вторая значительная веха предполагается в 2012 г. Именно тогда ожидается, что светоотдача СД превысит в два раза светоотдачу люминесцентных ламп (80—90 лм/Вт [5]), а стоимость одного люмена станет ниже 0,015 \$/лм. В более отдаленном будущем прогнозируется дальнейшее увеличение светоотдачи сверхъярких СД и уменьшение стоимости люмена. Вклад этого направления в мировую экономику может быть достаточно значительным. Основанием для этого могут быть такие аргументы [13]:

1. *Светоотдача сверхъярких СД.* Уже сейчас она выше, чем у ламп накаливания, и в ближайшем будущем превысит светоотдачу люминесцентных ламп. Потенциально возможный к. п. д. таких источников света значительно превышает к. п. д. существующих источников света и может достигать 10% и больше. Учитывая, что около 15% мировых расходов электроэнергии идет на освещение и рекламу, потенциальная возможность сэкономить хотя бы несколько процентов от этой величины означает экономию в деньгах порядка сотен миллиардов долларов.

2. *Возможность создания СД с управляемым цветом излучения.* Белый свет, полученный от СД, характеризуется яркостью и оттенками, комфортными для человека, а управление спектральным составом белого света в определенных границах производится сменой состава твердых растворов InGaN, на основе которых изготавливаются белые диоды.

3. *Срок службы и количество переключений источников света на основе СД.* Первый достигает величины порядка 100 тысяч часов, а второй по меньшей мере в 100 раз превышает аналогичные показатели существующих источников света. Это значит, что проблема утилизации существующих источников света практически отсутствует у источников света на основе СД.

4. *Возможность создания квазимонохроматических источников света.*

5. *Небольшое тепловыделение в процессе работы и высокая механическая прочность.*

6. *Большое быстродействие* (наносекунды).

7. *Система электропитания.* Исторически параметры электропитания бытовой техники подгонялись под потребности основных потребителей — источников света. Такая тенденция в электротехнике обусловлена в основном экономическими причинами. Система электропитания источников света на основе СД открывает возможность для создания нового поколения бытовой электроаппаратуры, которое будет использовать низковольтный постоянный ток. Это дает также дополнительные преимущества в борьбе за уменьшение электротравматизма, повышение пожарной безопасности зданий и бытовой техники.

Изготовление белых СД

Материалы для светодиодов видимого диапазона. Электромагнитное излучение, видимое человеческим глазом, лежит в диапазоне длин волн от 0,4 до 0,7 мкм. Длина волны СД определяется шириной запрещенной зоны полупроводникового материала согласно полуэмпирической формуле $\lambda = 1,24/E_g$, где λ — длина волны электромагнитного излучения в мкм, E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника в эВ. Из этого соотношения следует, что для изготовления СД видимого диапазона непригодны такие широко известные материалы как кремний и германий, ширина запрещенной зоны которых при комнатной температуре равна 1,12 и 0,72 эВ, соответственно. Для создания СД, которые излучают свет в видимом для человека диапазоне длин волн, используют полупроводники, ширина запрещенной зоны которых находится в интервале 1,7—3,1 эВ. К наиболее важным из них относятся $Al_{1-x}Ga_xAs$, $Al_{1-x}In_xGa_yP$, $In_{1-x}Ga_xN$, AlN , $ZnTe_{1-x}Se_x$, $Cd_xZn_{1-x}Se$, $Cd_xZn_{1-x}Te$, $CdS_{1-x}Se_x$, $Mg_xZn_{1-x}Te$ и др.

Кроме соответствующего значения E_g , важно, чтобы были отработаны также технология выращивания дешевых полупроводниковых монокристаллов и технология получения эффективных $p-n$ -переходов с соответствующим уровнем легирования слоев n - и p -типа проводимости. Поэтому при изготовлении СД не нашли заметного использования широкозонные полупроводники A^2B^6 , которые характеризуются прекрасными фотолюминесцентными свойствами, однако в них тяжело реализовать инверсию типа проводимости [14].

Типы гетероструктур и методы их получения. Впервые электролюминесцентное излучение было получено на основе простейших эпитаксиальных структур с $p-n$ -переходом [3]. Пример одной из таких гетероструктур показан на **рис. 1**. На подложку эпитаксиально наращивается переходный слой твердого раствора $GaAs_{1-x}P_x$ переменного состава (x изменяется от 0 до 0,4), а дальше слой $GaAs_{1-x}P_x$ посто-

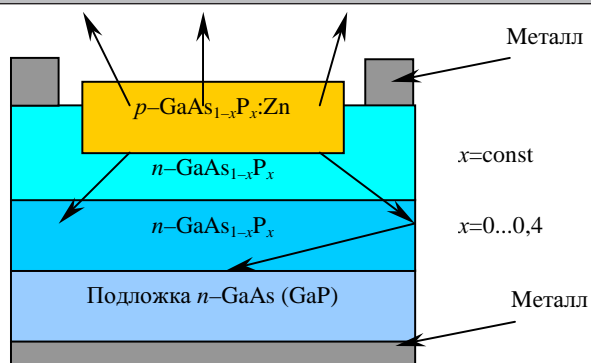


Рис. 1. Эпитаксиальная структура с гомопереходом для изготовления СД

янного состава с соответствующим значением x . Переходный слой ограничивает образование безызлучательных центров, обусловленных разницей в параметрах решетки подложки и эпитаксиального слоя. p -область создается диффузией цинка в слой n -GaAs $_{1-x}$ P $_x$ или эпитаксиальным наращиванием. Фотоны генерируются в p -области вблизи p - n -перехода и излучаются во всех направлениях (их ход показан на рис. 1 стрелками). До наблюдателя доходит та часть из них, которая проходит через поверхность между контактами. Уменьшение количества фотонов обусловлено поглощением во внутренних слоях подложки и потерями за счет отражения.

Значительно эффективнее многопроходная двойная гетероструктура, изображенная на рис. 2. Процесс изготовления такой гетероструктуры несколько сложнее, т. к. требует удаления полупроводниковой подложки после наращивания всех слоев. На подложке InP формируются слои AlInGaP, p - и n -типа проводимости с разной шириной запрещенной зоны E_{g1} , E_{g2} . Если выполняется условие $E_{g2} < E_{g1}$, то такая структура, имеющая два гетероперехода, называется двойной гетероструктурой (ДГС). При такой архитектуре эпитаксиальной структуры инжектированные из n - в p -область электроны задерживаются снизу энергетическим барьером, который возникает на гетерогранице p_1 -AlInGaP- p_2 -AlInGaP. В результате этого уменьшается вероятность безызлучательной рекомбинации электронов и, соответственно, возрастает светоотдача структуры. После нанесения сплошного металлического контакта на n -AlInGaP-слой подложка InP стравливается. Фотоны генерируются в тонком

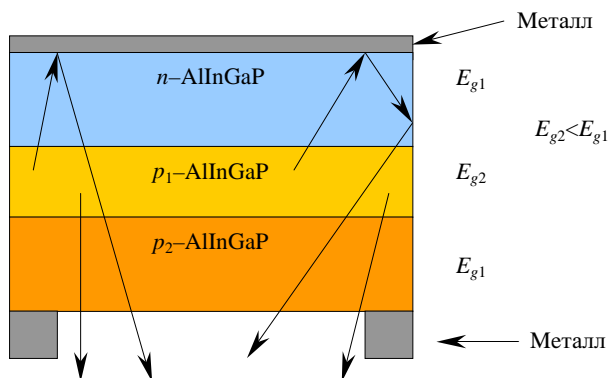


Рис. 2. Многопроходная двойная гетероструктура на основе AlInGaP

(≈ 1 мкм) p_1 -AlInGaP-слое и распространяются во всех направлениях. Широкощелевые слои n -AlInGaP и p_2 -AlInGaP прозрачны для фотонов, поэтому фотоны, направленные в сторону сплошного металлического контакта, отражаются от него и выходят через поверхностный слой p_2 -AlInGaP наружу. Толщина слоев n -AlInGaP и p_2 -AlInGaP небольшая (≈ 10 мкм), поэтому потери на поглощение и рассеивание света на боковых гранях кристалла незначительны. Светоотдача таких гетероструктур почти в два раза выше по сравнению со светоотдачей гетероструктуры, изображенной на рис. 1. Такие структуры получают методами жидкофазной и МОС-гидридной эпитаксии.

Типичная эпитаксиальная гетероструктура на основе InGaN изображена на рис. 3. На основе такой структуры изготавливаются сверхъяркие СД зеленого и синего света. Это типичная двойная гетероструктура с буфер-

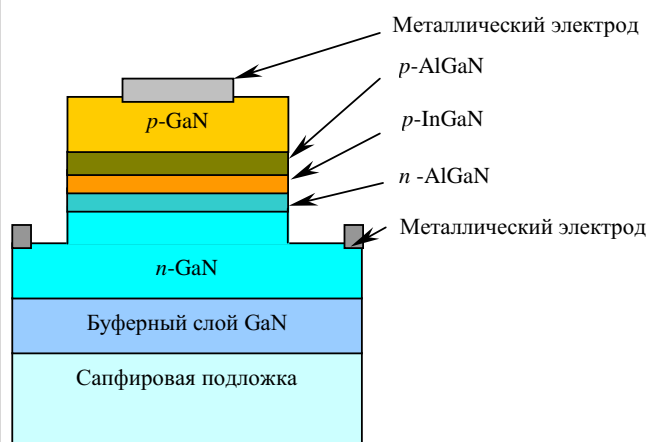


Рис. 3. Типичная эпитаксиальная гетероструктура AlGaIn — InGaN для изготовления светодиодов зеленого и синего света

ным слоем GaN, предназначенным для согласования параметров решетки между сапфировой подложкой и кристаллической решеткой слоев гетероструктуры. Светодиодный чип изготовлен с односторонним размещением контактов к n - и p -областям структуры. Основным методом получения таких структур является метод МОС-гидридной эпитаксии.

В табл. 2 собраны основные данные по эмиссионным свойствам ярких светоизлучающих диодов, изготовленных на основе разных гетероструктур [4].

Как видно из табл. 2, наибольшей квантовой эффективностью характеризуются СД из AlGaAs. Однако на основе этого материала могут быть изготовлены только СД красного диапазона света. Самую высокую светоотдачу обеспечивают СД на основе AlInGaP (≈ 20 лм/Вт) [8]. На базе этого материала изготавливают сверхъяркие СД не только красного, но и оранжевого, и желтого цветов. Безусловно, это основной материал для изготовления светоизлучающих приборов этого спектрального диапазона.

Привлекают к себе внимание гетероструктуры на основе ZnTeSe. Из этих гетероструктур изготовлены зеленые СД с высокой светоотдачей (≈ 18 лм/Вт). Это перспективный материал, однако он может быть широко использован только в том случае, когда будет решена проблема получения высококачественных (с

Эмиссионные свойства СД видимого диапазона на основе гетероструктур разного типа

Материал основы СД	Пиковая длина волны генерации света, нм	Тип эпитаксиальной структуры	Квантовая эффективность, %	Светоотдача, лм/Вт
GaAsP	700	Гомопереход (ГП)	0,2	0,15
AlGaAs	650	ДГС	16,0	8,0
AlInGaP	620	ДГС	6,0	20,0
AlInGaP	585	ДГС	5,0	20,0
AlInGaP	570	ДГС	1,0	6,0
GaP	555	ГП	0,1	0,6
InGaN	514	ДГС	2,6	7,0
ZnTeSe	512	ДГС	5,3	18,0
ZnCdSe	489	ДГС	1,3	1,7
SiC	470	ГП	0,03	0,04
InGaN	450	ДГС	3,8	3,6

низкой плотностью дислокаций) подложек большого диаметра ($\approx 50\text{--}60$ мм). Таким образом, и сейчас, и в прогнозируемом ближайшем будущем, основным материалом для СД зеленого и синего цветов являются твердые растворы InGaN [15]. Технология получения этих структур хорошо отработана, хотя остаются еще определенные резервы для ее усовершенствования.

Следует отметить, что очень важное значение играет тот факт, что в промышленных масштабах освоен выпуск сапфировых подложек диаметром 60—100 мм и больше, а также получены таких же диаметров более дешевые подложки из карбида кремния. Большое значение для снижения стоимости продукции имеет также то, что достигнуты значительные успехи в выпуске высокопродуктивного технологического оборудования для получения гетероструктур A^3B^5 -материалов методом МОС-гидридной эпитаксии, в частности, это установки фирмы AIXTRON [16].

Методы получения гетероструктур для СД. Жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ) — процесс выращивания монокристаллических слоев из пересыщенных растворов-расплавов металлов (таких как галлий, индий, висмут). Рост слоя полупроводникового материала достигается охлаждением жидкой фазы (раствора-расплава, насыщенного соответствующим соединением A^3B^5 и легирующими компонентами), которая контактирует с подложкой A^3B^5 ниже температуры насыщения. При наращивании эпитаксиального монослоя процесс наращивания проходит три основных стадии:

1. Приведение подложки A^3B^5 в контакт с раствором-расплавом, состав которого соответствует кривой ликвидуса наращиваемого полупроводникового соединения.
2. Выращивание необходимого слоя путем контролируемого охлаждения насыщенного раствора-расплава.
3. Удаление жидкой фазы с поверхности выращенной пленки для остановки процесса роста.

При выращивании многослойной гетероструктуры процесс ЖФЭ состоит из многих ростовых операций, в каждой из которых используются разные расплавы, состав которых подбирается с целью обеспечить наращивание слоя необходимого состава и уровня легирования. Этот метод обеспечивает наиболее равновесные условия роста, при которых можно по-

лучить эпитаксиальные слои с низкой концентрацией дефектов.

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) — процесс эпитаксиального наращивания тонких слоев разных соединений благодаря реакциям, которые происходят между термически созданными молекулярными или атомными пучками соответствующих компонентов и поверхностью подложки, находящейся в сверхглубоком вакууме при повышенной температуре.

МЛЭ значительно отличается от других технологий, которые используются для получения полупроводниковых структур, следующими факторами:

1. Небольшая скорость роста — 1 нм/мин.
2. Относительно низкая температура роста.
3. Возможность введения различных газообразных компонентов для изменения состава слоя и управления концентрацией примеси.
4. Атомарно-гладкая поверхность кристаллизирующейся пленки.
5. Возможность анализа параметров пленки в процессе роста.

Основным недостатком этого метода является тот факт, что оборудование для МЛЭ стоит очень дорого и недостаточно продуктивно.

МОС-гидридная эпитаксия — метод роста эпитаксиальных слоев и структур из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений (МОС) — широкого класса веществ, содержащих металл-кислород-углеродные связи или координационные соединения металлов с органическими молекулами. Кристаллизация в процессе МОС-гидридной эпитаксии происходит за счет реакций пиролиза при пропускании однородной газовой смеси реагентов — металлоорганических соединений, содержащих элемент третьей группы (например Ga) и элемент пятой группы (As) над нагретой с помощью ВЧ-генератора подложкой в реакторе с холодными стенками. Необходимо точно контролировать главным образом только температуру подложки.

Фирмы-изготовители гетероструктур для СД и характеристика их продукции. На сегодняшний день изготовлением гетероструктур занимается ряд ведущих фирм, в частности такие как ATMI (USA), United Epitaxy Company (Taiwan), Technologies and Devices International Inc (TDI) (USA), QinetiQ Ltd (UK), IQE Inc (USA) [16, 17].

Типичной промышленной технологией наращивания гетероструктур является метод МОС-гидридной эпитаксии. Это обусловлено как физическими свойствами материалов A^3B^5 (высокая температура плавления, низкая химическая активность), так и значительными успехами в разработке промышленных высокопродуктивных эпитаксиальных установок. Типичный процесс наращивания эпитаксиальной гетероструктуры для голубых или белых СД включает в себя следующие шаги [18]:

1. Нагрев сапфировой подложки и нитридизация ее поверхности при температуре порядка 1000°C .

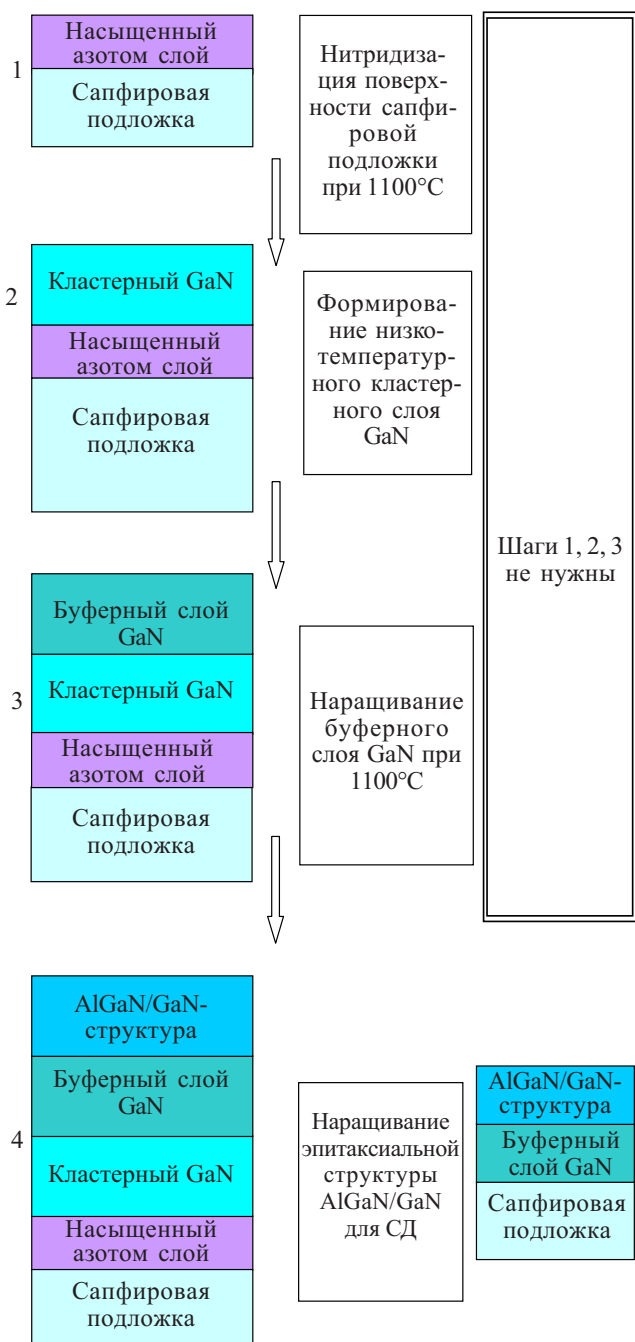


Рис. 4. Схематический маршрут изготовления голубых диодов согласно традиционному (слева) и предложенному фирмой TDI (справа) подходам

2. Охлаждение подложки до температуры порядка 600°C и наращивание тонкого промежуточного слоя GaN ($\approx 0,5$ мкм).

3. Отжиг сапфировой подложки с промежуточным слоем при температуре $\approx 1000^\circ\text{C}$.

4. Наращивание буферного слоя GaN толщиной 2—4 мкм (наращивание длится 2—4 ч).

5. Наращивание многослойной гетероструктуры с p - n -переходом, в том числе и с наноразмерными слоями (общая толщина гетероструктуры составляет ≈ 1 мкм).

Фирмой Technologies and Devices International Inc (TDI) для снижения стоимости продукции и повышения качества гетероструктур для белых диодов предложен другой подход [18]. На первом этапе формирования гетероструктуры методом гидридной газофазной эпитаксии (Hydride Vapor Phase Epitaxy) на сапфировую подложку наращивается толстый слой GaN. На втором этапе методом MOSVD формируется многослойная гетероструктура AlGaIn/GaN с p - n -переходом для СД. Для сравнения на рис. 4 схематически приведена технологическая цепочка изготовления гетероструктур согласно типовому процессу с использованием MOSVD-технологии и процессу, предложенному фирмой TDI. Как видно из рис. 4, новая технология позволяет избежать ряда шагов, в частности 1, 2, 3, которые являются обязательными для MOSVD-технологии. Учитывая их значительную продолжительность и необходимость нагрева подложки до высоких температур, применение новой технологии позволяет значительно снизить стоимость и повысить качество гетероструктур для СД.

Пути создания сверхъярких СД белого света. На сегодняшний день существуют пять основных путей получения белого света благодаря применению полупроводниковых материалов A^3B^5 . К ним относятся следующие:

1. Размещение в одном корпусе трех микрокристаллов (чипов), которые обеспечивают излучение света трех основных цветов — красного, зеленого и синего [19, 20]. Конструкция такого СД показана на рис. 5.

Подбирая интенсивность излучения на каждой из трех основных длин волн, а также корректируя положение их максимумов изменением состава твердого раствора активных слоев (обеспечивающих необходимую длину волны электромагнитного излучения),

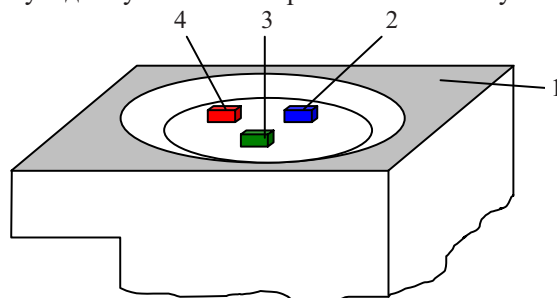


Рис. 5. Конструкция белого светоизлучающего диода на основе чипов красного, зеленого и синего свечения: 1 — вывод катода с чашеобразным рефлектором; 2 — чип синего цвета излучения; 3 — чип зеленого цвета излучения; 4 — чип красного цвета излучения

можно достигнуть желаемого тона белого света. Этот путь позволяет создавать СД с управляемой длиной волны излучения.

2. Использование синих светоизлучающих диодов, покрытых люминофором на основе фосфора [1]. Белый свет получается благодаря возбуждению коротковолновым (синим) светом длинноволнового люминесцентного излучения в люминофоре. Люминофор превращает синий свет в широкополосное излучение видимого диапазона, воспринимаемое как белый свет определенного оттенка. Улучшение светоотдачи белых диодов, работа которых базируется на конвертировании света, будет зависеть как от улучшения квантового выхода гетероструктур, так и, особенно, от усовершенствования люминесцентных материалов. Одним из многообещающих путей является разработка люминофоров на основе фосфора с добавками редкоземельных элементов. Считается, что именно этот подход позволит полностью удовлетворить базовые требования к высокой адсорбционной способности люминофоров и эффективности конвертирования света. Конструкция такого белого СД изображена на **рис. 6**. На основе этого способа сейчас изготавливают большинство белых диодов.

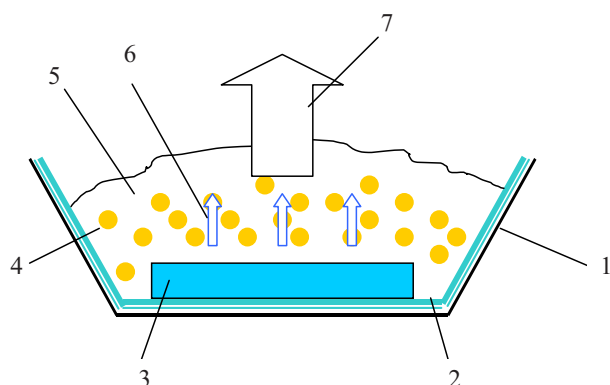


Рис. 6. Конвертирование света в белых светоизлучающих диодах на основе InGaN:

1 — корпус чашеобразного рефлектора; 2 — серебряное зеркальное покрытие; 3 — чип светоизлучающего диода на основе InGaN; 4 — включения желтого фосфора; 5 — силиконовый наполнитель; 6 — синий свет, излучаемый чипом на основе InGaN; 7 — белый свет

3. Использование ультрафиолетовых чипов на основе GaN, покрытых специальным покрытием с добавлением фосфора. Принцип образования белого света тот же, что и в пункте 2, с той лишь разницей, что возбуждение специального люминофора здесь происходит ультрафиолетовым излучением чипа на основе GaN [21].

4. Использование органических материалов. Органические СД — это тонкопленочные структуры с толщиной пленок 100—500 Å, а не кристаллы. Обычно эти пленки укладывают друг на друга химическими методами, вакуумным нанесением или же набрызгиванием с помощью краскоструйного принтера с последующей полимеризацией. Структура органического светоизлучающего диода представлена на **рис. 7**. При прохождении тока через структуру из 3 или 4 пленок в них возникают экситоны, с помощью которых совершается перенос энергии и передача ее фотолюминесцирующей органической пленке либо са-

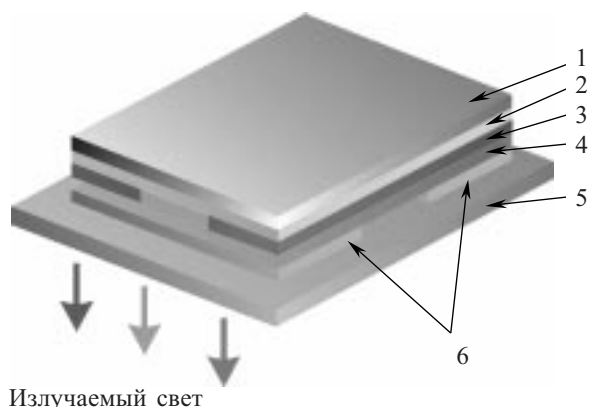


Рис. 7. Органический светоизлучающий диод:

1 — металлический катод; 2 — слой, передающий электроны; 3 — излучающий слой; 4 — слой, передающий дырки; 5 — стеклянная или полимерная подложка; 6 — прозрачные электроды

мостоятельная рекомбинация с излучением света. В зависимости от того, какая эта пленка по химическому составу и структуре молекул, цвет свечения может сильно отличаться. Рекордные достигнутые яркости составляют $2 \cdot 10^5$ кд/м² [22].

5. Использование гетероструктур с квантоворазмерными слоями, которые благодаря соответствующему подбору параметров квантоворазмерных слоев (толщины и состава) позволяют получить необходимую длину волны излучения чипа. Работы в этом направлении проводятся на уровне лабораторных исследований. Этот путь перспективен и в будущем, возможно, станет одним из доминирующих [6].

Параметры белых СД основных фирм-изготовителей

На сегодняшний день не менее десяти ведущих фирм выпускают СД белого света различной конструкции, в частности, “ламповые”, “автомобильные”, для информационных табло и экранов [23—26]. “Ламповые” СД, как правило, имеют цилиндрический корпус с выпуклой линзой для расфокусирования светового потока. Угол излучения таких диодов находится в пределах 20—40°. “Автомобильные” СД характеризуются полусферическим корпусом, а угол излучения большой и составляет 40—80°. Светодиоды для экранов оснащены корпусом, применимым для монтажа на платах [27]. Отражатель света и линза в них такой формы, которая позволяет формировать узкий (до 15°) световой поток высокой яркости. Для уличного освещения предложена лампа, содержащая 700 СД белого света. Такая лампа, питаемая напряжением 24 В и потребляя всего 56 Вт, обеспечивает освещенность от 80 до 660 лк [28].

В **табл. 3** приведены параметры СД белого света, выпускаемых ведущими фирмами мира. Учитывая тот факт, что при разработке источников света на основе белых СД используются СД с большой силой света, в таблицу были включены только СД с силой света не меньше 1000 мкд.

Анализ данных, приведенных в **табл. 3**, показывает, что большинство изготовителей белых диодов используют путь, описанный в предыдущем подразделе. Он базируется на использовании кристаллов InGaN,

Таблица 3

Основные параметры белых светодиодов ведущих фирм мира

Тип светодиода	Фирма-изготовитель	Материал	Сила света, мкд	Рабочее напряжение, В	Рабочий ток, мА	Угол излучения, 2 α /2°	Приведенная сила света I _п , мкд/(мА·°)	Цена, дол. США	Литературный источник	Примечания
L-5S3UWG-C1	PARA LIGHT (США)	...	3000	3,5÷4,5	20	20	...	2,5	[29]	Ø5 мм
L-5T3LW5C-D1	"	Ga In N	6000	3,5÷4,5	10	20	30,0	...	[29]	Ø5 мм
L-5T3UW5C-D1	"	Ga In N	7000	3,5÷4,5	10	20	35,0	...	[29]	Ø5 мм
L-5T3LW5C-D2	"	Ga In N	4000	3,5÷4,5	10	30	13,3	..	[29]	Ø5 мм
L-5T3UW5C-D2	"	Ga In N	5000	3,5÷4,5	10	30	16,7	...	[29]	Ø5 мм
L-5T3VW5C-D3	"	Ga In N	3500	3,5÷4,5	10	40	8,75	...	[29]	Ø5 мм
NSPW 300BS	NICHIA (Южная Корея)	In Ga N	3200	3,6÷4,0	20	25	6,4	...	[30]	Ø3 мм
NSPW310BS	"	In Ga N	1500	3,6÷4,0	20	60	1,25	...	[30]	Ø3 мм
NSPW 312BS	"	In Ga N	2200	3,6÷4,0	20	35	3,14	...	[30]	Ø3 мм
NSPW 500BS	"	In Ga N	7800	3,6÷4,0	20	20	19,5	3,47	[30]	Ø5 мм
NSTM515AS	"	AlGaInP, In Ga N	к 110/150 з 370/520 с 75/110	3,6÷4,0	20/50 20/30 20/30	80	...	...	[30]	Ø5,6 мм
LED 25 deg WH	The Led Light (США)	Ga In N	3200	4,0	10	25	12,8	2,4	[31]	Ø3 мм
LED 35 deg WH	"	Ga In N	3200	4,0	10	35	6,3	2,4	[31]	Ø3 мм
LED 20 deg WH	"	Ga In N	6400	4,0	10	20	32	2,6	[31]	Ø5 мм
LED 35 deg WH	"	Ga In N	3250	4,0	10	35	9,3	2,6	[31]	Ø5 мм
LED 50 deg WH	"	Ga In N	1800	4,0	10	50	3,6	2,6	[31]	Ø5 мм
LED 20 deg WMWH	"	Ga In N	2000	4,0	10	20	10,0	2,6	[31]	Ø5 мм
383UWC	ROITHNER LASERTECHNIK (Австрия)	Ga In N	3700	...	20	13	14,2	2,25	[25]	—
L5T20W	"	Ga In N	2500	...	20	20	6,25	1,1	[25, 32]	Ø5 мм
HLWW-L51	"	Ga In N	4200	...	20	15	14,0	2,5	[25, 32]	—
HUWH-5101L	"	Ga In N	3700	...	20	...	...	2,25	[25, 32]	Ø5 мм
HUWH-3101L	"	Ga In N	3700	...	20	...	...	2,25	[25, 32]	Ø3 мм
LEDW-47-66-60-120	"	Ga In N	13000	...	240	...	...	164,80	[25, 32]	60 кристаллов
LEDW-47-66-60	"	Ga In N	13000	...	240	...	...	148,00	[25, 32]	60 кристаллов
HLMP-CW1x-ROOxx	Agilent technologies (США)	In Ga P	1500	3,8÷4,0	20	15	5	...	[33]	Ø10 мм
L5S3 UWG-C1	Laser Optronix (США)	In Ga N	3000	3,6÷4,0	...	...	...	2,50	[34]	—
LEDС-W 469	Корвет-Лайтс (Россия)	In Ga P	2000	3,6	40	20	3,1÷4,2	2,50	[35]	—
СДК-Б469-4-30	"	In Ga N	3700÷5000	3,6	40	30	3,1÷4,2	2,50	[35]	—
У-164 Бл	"	In Ga N	30000÷50000	4,0	30	8	125÷208	...	[13]	Неизвестно количество кристаллов

Основные параметры светодиодных модулей и ламп на основе белых диодов некоторых фирм мира

Название модуля, лампы	Фирма-изготовитель	Количество диодов	Рабочий ток, мА	Рабочее напряжение, В	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Сила света, кд	Размеры, мм	Цена, дол. США	Литературный источник	Примечания
Светодиодные модули											
DIY- 9	The Led Light (США)	9	90	4,0	...	...	...	29×29	45,0	[31]	Модуль на плате
DIY- 12	То же	12	120	4,0	...	...	...	35×35	60,0	[31]	Модуль на плате
DIY- 24R	"	24	240	4,0	...	...	...	83×83	125,0	[31]	Модуль на плате
DIY-36R	"	36	360	4,0	...	...	...	86×86	185,0	[31]	С рефлектором модуль на плате
Y-200Бл	НПЦ ОПТЭЛ (Россия)	...	...	4,0	...	...	1200—3000	...	...	[13]	—
LINEAR Light	OSRAM (Германия)	32	...	10,0	3,2	...	0,42	56×10×3,5	...	[40]	—
MARKER Light	То же	*	...	10/24*	...	...	Яркость до 80—1260 кд/м ²	85×37×6,7 112,5×48×6,7 140×59×6,7 85×85×6,7 Ø110×6,7	...	[40]	*Зависит от типа
Источники света											
Пермь LC18×5+12	ООО ЛЛТ "Световод" (Россия)	90+12	...	12—48 или 85—250	10	150—500	...	60×100	...	[38]	Стандартный цоколь
Орел MR-16	То же	33	...	10—24	4	...	7—800	50×48	...	[38]	Цоколь GU5,3
E27-W36-G WhiteLEDbulb	Superbrightleds (США)	36	...	110	2,6	50	...	85×60	18,95	[39]	—
AC-6	The Led Light(США)	6	60	120	3	60	...	h=95, Ø27	45,90	[31]	Стандартный цоколь
AC-18	То же	18	30	120/240	15	180	...	h=127, Ø51	94,0	[31]	Стандартный цоколь
AC-36	"	36	30	120/240	30	360	...	h=83, Ø64	190,0	[31]	Стандартный цоколь

покрытых сверху специальным фосфорсодержащим люминофором. Белый свет в этом покрытии индуцируется синим светом. Существенным недостатком этого способа является то, что в спектре излучения такого диода интенсивность синего света доминирует.

Некоторые фирмы, такие как NICHIA (Южная Корея) [30], Корвет-Лайтс (Россия) [35, 36], изготавливают также полноцветовые СД, белый свет в которых формируется благодаря смешиванию электромагнитных волн трех цветов — красного (R), зеленого (G) и синего (B). Баланс белого в таких диодах обеспечивается при соотношении потоков монохроматического излучения R:G:B=3:6:1. Это соотношение приблизительно, поскольку зависит от типа СД. Можно ожидать, что в ближайшем будущем с уменьшением стоимости светодиодов именно этот путь формирования белого света будет преобладать при создании белых диодов, используемых для производства источников света для бытовых нужд.

Фирмы по-разному подходят к проблеме улучшения излучающих характеристик СД. Фирма NICHIA и The Led Light основное внимание обращают на улучшение излучающих характеристик гетероструктур [30, 31]. Фирма Корвет-Лайтс значительного повышения осевой силы света достигает за счет увеличения прямого тока через кристалл и формирования пространственного распределения светового потока с помощью разного типа линз [20].

Большинство фирм не предоставляет информации о конструкции СД, в частности о размерах кристалла и его квантовой эффективности. Площадь кристаллов в ярких СД может изменяться в пределах от 0,5 до 1 мм² и больше.

Для приблизительной оценки нами введен специальный параметр — приведенная сила света I_p [мкд/(мА·°)]. Этот параметр не зависит от величины тока через СД и от угла излучения света. Если оценивать СД по этому параметру, то к лучшим из них можно отнести СД фирм PARA LIGHT, NICHIA. Для СД российской фирмы НПЦ ОПТЭЛ, для которых $I_p = 125...308$, в рекламных материалах не указано количество кристаллов. Стоимость СД хорошего качества находится в пределах 3,5—5 дол. США за штуку при условии поставки партий до 100 диодов и 2,0—3,0 дол. США, если размер партии составляет 1000 шт. и больше.

На основе белых СД ряд фирм освоил выпуск светодиодных модулей и источников белого света [37—39]. Основные параметры модулей и источников белого света некоторых фирм приведены в табл. 4. Фирмы The Led Light, Osram, Ludwig Leuchten, Reggiani организовали производство источников света на основе белых СД. У этих источников света присутствуют стандартный цоколь и рифленая или матовая стеклянная колба цилиндрической формы. Стоимость таких ламп пока еще достаточно высока.

Выводы

Принимая во внимание современное состояние технологии изготовления сверхярких светоизлучающих диодов, в частности СД белого света, и достигнутые высокие светотехнические параметры источников света на их основе, можно сделать вывод, что в ближайшем будущем традиционные источники света — лампы накаливания и люминесцентные лампы — будут заменены на светодиодные. При формировании программы развития источников света на основе СД целесообразно на первом этапе, учитывая их высокую стоимость, разрабатывать источники света для шахт, больших магазинов, автомобилей, источников служебного света.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хайнд Р., Вахтманн К. Неорганические светодиоды. Обзор // Светотехника.— 2003.— № 3.— С. 7—13.
2. Лосев О. В. У истоков полупроводниковой техники.— Л.: Наука, 1972.
3. Коган Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды.— М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. James W., Cook Jr., Schetzina J. F. Blue-green light-emitting diodes promise full-color displays // Laser Focus World.— 1995.— N 5.— P. 101—104.
5. Mills A. Solid state lighting—a world of expanding opportunities at LED 2002// III-Vs Review.— 2003.— Vol. 16, N 1.— P. 30—33.
6. Коган Л. М. Полупроводниковые светодиоды: современное состояние // Светотехника.— 2000.— № 6.— С. 11—15.
7. Коган Л. Дальнейшее развитие оптоэлектронных приборов // Новые компоненты.— 1998.— № 4.— С. 55—58.
8. Mills A. Nitrides in Nara// III-Vs Review.— 2003.— Vol. 16, N 6.— P. 34—38.
9. Юнович А. Э. Светодиоды на основе гетероструктур из нитрида галлия и его твердых растворов// Светотехника.— 1996.— № 5/6.— С. 2—7.
10. Коган Л. Светоизлучающие диоды: дальнейшее развитие// Там же.— 1999.— № 4.— С. 23—27.
11. Коган Л., Рассохин И. Светодиодные осветительные модули направленного действия // Электронные компоненты.— 2001.— № 1.— С. 37—38.
12. Сорокин В., Гурьянов С. Новые технологии идут на службу рекламе // СВТЛЮлюкс.— 2004.— № 2.— С. 20—24.
13. Коган Л. М. Светодиодные осветительные приборы// Светотехника.— 2002.— № 5.— С. 16—20.

14. Берченко Н. Н., Кревс В. Е., Средин В. Г. Полупроводниковые твердые растворы и их применение. Справочные таблицы.— М.: Воениздат, 1982.
15. Голуб В. Сверхяркие светодиоды больших размеров // ЭКиС.— 2000.— № 12.— С. 33—36.
16. Szweida R. Taiwan expands device capabilities // III-Vs Review. Buyer's Guide 2002/2003.— P. 10—15.
17. LED lights on track (short information) // III-Vs Review.— 2003.— Vol. 16, N 1.— P. 24.
18. www.tdii.com
19. Pat. 6633120 USA. Led lamps / Hassan P. A. Salam.— 14.10.03.
20. Агафонов Д. Р., Аникин П. П., Никифоров С. Г. Вопросы конструирования и производства светоизлучающих диодов и систем на их основе // Светотехника.— 2002.— № 6.— С. 6—11.
21. Pat. 6963166 USA. Led lamp / Tadashi Yano, Masanori Shimizu, Nobuyuki Matsui et al.— 8.11.05.
22. Сорокин В., Гурьянов С. Новые технологии идут на службу рекламе // СВТЛЮлюкс.— 2004.— № 4.— С. 37—40.
23. Коган Л. М. Новые светодиоды и устройства на их основе // Светотехника.— 1997.— № 3.— С. 27—30.
24. Фишер У. SATINOSA: плоские световые знаки на основе светодиодов // Там же.— 1999.— № 2.— С. 11—13.
25. Каталог фирмы ROITHNER Laser technik, 2003.
26. Голуб В., Чернявский Р. Сверхяркие светодиоды для полноцветных крупноформатных наружных экранов // ЭКиС.— 2003.— № 1.— С. 31—33.
27. Тринчук Б. Ф. Светосигнальная аппаратура на светодиодах // Светотехника.— 1997.— № 5.— С. 6—11.
28. Tsunemasa Taguchi. The 21st century lighting project based on LED and phosphor systems // Conf. "Strategies in light".— San Francisco (USA).— 2000.— P. 817—820.
29. www.paralight.com
30. Каталог фирмы NICHIA, 2003.
31. www.ledlight.com
32. www.roithner-laser.com
33. www.agilent.com/semiconductors/
34. www.Laseroptronics.com
35. www.corvette-lights.ru
36. Каталог фирмы Корвет-Лайтс, 2003.
37. Гвоздев-Карелин С. В., Хартманн Р. Светодиодные модули фирмы OSRAM // Светотехника.— 2002.— № 3.— С. 38—40.
38. http://www.leds.ru/portfolio.php
39. www.superbrightleds.com
40. Айзенберг Ю. Б. Седьмая международная светотехническая выставка // Светотехника.— 2002.— № 2.— С. 32—36.

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Взаимодействие атомарного водорода с поверхностью монокристаллов кремния. (Украина, г. Запорожье)
- PSpice моделирование оптических локаторов. (Украина, г. Одесса)
- О путях снижения энергопотребления мощными ТВ-передатчиками эфирного телевидения. (Украина, г. Киев)
- Моделирование высоковольтного горизонтального р-канального МОП-транзистора. (Беларусь, г. Минск)
- Мощные резисторы нового поколения. (Украина, г. Одесса)
- Координатно-чувствительные устройства на основе АОТ. (Украина, г. Черновцы)
- Дозиметры энергетической освещенности ультрафиолетового излучения «Тензор». (Украина, г. Черновцы)
- Кодирование изображений на основе нечеткой классификации фрагментов. (Украина, г. Харьков)
- Радиометр ультрафиолетового излучения «Тензор-31». (Украина, г. Черновцы)
- Повышение надежности антидиффузионных переходов никелевых контактов на ветвях термоэлектрических модулей Пельтье. (Украина, г. Черновцы)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

