

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЛАМПА – ИСТОЧНИК ОСВЕЩЕНИЯ, АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ЛАМПАМ НАКАЛИВАНИЯ И ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМ ЛАМПАМ

В.Н. Гридин¹, И.В. Рыжиков¹, В.С. Виноградов², В.Н. Щербаков³

¹ Центр информационных технологий в проектировании РАН, Одинцово, Россия,

² Московский государственный университет приборостроения и информатики, Москва, Россия,

³ ЗАО «Пола+», Москва, Россия

Аннотация

Проанализировано развитие и проведен сравнительный анализ источников света. Представлены принципы создания, элементы конструкции и технологии изготовления светодиодов и светодиодных устройств белого цвета свечения (полупроводниковых ламп), динамика рынка светодиодов.

Ключевые слова: полупроводниковая лампа, светодиод, источник света.

1. Историческая справка

Впервые холодный свет точечного контакта с карборундом наблюдал в 1927 г. О.Лосев в Нижегородской радиотехнической лаборатории. Впоследствии этот эффект был идентифицирован как инжекционная люминесценция p-n-перехода [1].

Первые светодиоды разработаны в 1962 г. Н. Холоньяком («General Electric», США) на основе твердых растворов арсенида фосфида галлия, И.И. Кругловым и И.В. Рыжиковым (НИИ «Сапфир», СССР) на основе карбида кремния [2, 3]. Промышленный выпуск был налажен в шестидесятых годах фирмами Monsanto и Hewlett-Packard (США), Опытным заводом при НИИ «Сапфир» и Саранским электроламповым заводом [1–4]. Световой поток составлял 0,001 лм, цвет – красный и желтый.

К 1976 г. были получены оранжевые, желтые и желто-зеленые светодиоды со световым потоком 0,1 лм. До 1985 г. они использовались исключительно в качестве индикаторов. К 1985 г. их световой поток увеличился до 1–100 лм и они уже стали применяться в качестве элементов освещения, например, как лампы в автомобиле [5–15].

В 1990 г. эффективность полупроводниковых ламп достигла 10 лм/Вт, что позволило им стать адекватной заменой ламп накаливания.

Конец 20-го века ознаменовался революционными изменениями в области освещения. Светодиоды прочно заняли свое место в секторе монохромного освещения, найдя свое применение в автомобильных тормозных фонарях, светофорах, дорожных знаках, вывесках и указателях. Последние достижения базовой полупроводниковой технологии позволяют светодиодам в скором времени составить серьезную конкуренцию существующим источникам белого света. Вдобавок к долговечности и низкому энергопотреблению, они обладают целым рядом преимуществ перед существующими на сегодняшний день и широко используемыми источниками света. Небольшие размеры делают спектр их применения необычайно широким. Несколько светодиодов, объединенных в один корпус, способны заменить обычную лампу накаливания и электролюми-

несцентную лампу. Расположенные по прямой, они могут освещать большие площади по периметру и т.д. Как источники света для наружного и декоративного освещения полупроводниковые лампы обладают рядом уникальных достоинств, среди которых точная направленность света и возможность управления цветом и интенсивностью излучения. Все это позволяет предположить, что наступившее третье тысячелетие станут по праву называть эрой светодиодной техники.

Получение светодиодов со все большей световой эффективностью стало возможным за счет поиска и использования новых материалов с большей светоотдачей и цветовым спектром. Первыми появились светодиоды на основе GaAlInP с цветами от красного до желто-зеленого и светоотдачей 20 лм/Вт. В 1993 году японская корпорация Nichia объявила об открытии высокоэффективного материала для источников синего цвета – нитрида галлия (GaN) [8]. Это означает, что в настоящее время светодиоды освоили практически весь видимый цветовой спектр, что существенно расширило области их применения и сделало возможным получение источников белого света путем объединения световых потоков красных, зеленых и голубых светодиодов.

Для того, чтобы осуществить прорыв на рынок общего освещения, требующего от источников световой поток порядка 100 лм/Вт и выше, необходимо добиться увеличения световой эффективности в основном зеленых и синих светодиодах.

Строить прогноз роста эффективности белых светодиодов довольно сложно. Однако т.к. в настоящее время эффективность зеленых и синих чипов составляет в среднем 10%, то это открывает определенные перспективы роста эффективности. Когда она достигнет уровня 100–150 лм/Вт, они станут реальной альтернативой люминесцентным лампам.

Такой оптимистический прогноз базируется на примере красных светодиодов, чья эффективность еще в конце 80-х была лишь 5 лм/Вт, а в настоящее время достигла 75 лм/Вт [11].

Следует отметить, что на долю освещения приходится около 16% всей производимой в стране

электроэнергии. Можно выделить 3 основных сектора потребителей электроэнергии для освещения: промышленный, коммерческий (общественный) и жилой. Потребности каждого из секторов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Потребление электроэнергии на освещение

Сектор	Доля освещения в потребляемой сектором электроэнергии, %	Ежегодное увеличение потребления электроэнергии на освещение, %
Промышленный	6,3	0,9
Коммерческий	28,6	0,1
Жилой	11,4	1,5

Увеличение световой эффективности существующих ресурсов освещения позволит производить необходимое количество света, уменьшая при этом потребление электроэнергии. Каковы тенденции рынка освещения сегодня? Из приведённого ниже графика (рис. 1) видно, что они имеют стойкую тенденцию к дальнейшему развитию.



Рис. 1. Сравнение существующей и прогнозируемой эффективности развития видов освещения в 1970–2020 гг.

Характерно то, что низкоэффективные лампы накаливания затрачивают электричество для нагревания вольфрамовой нити, которая кроме света производит еще и тепло.

Люминесцентные лампы, хотя и эффективнее ламп накаливания почти в 6 раз, используются в освещении жилых помещений не так широко, как лампы накаливания, по причине неадекватной восприимчивости света человеческим глазом и дороговизны. Галогенные лампы могут составить конкуренцию лампам накаливания, однако массовое их использование ограничено рядом причин, в том числе и высокой ценой. Что касается светодиодов, максимальная эффективность которых еще не достигнута, потенциально они могут претендовать на значительную долю рынка освещения в течение ближайших 10–20 лет.

Однако использование различных по эффективности источников света неоднородно в зависимости от групп потребителей. Коммерческий и промышленный секторы используют большее количество высокоэффективных источников освещения, нежели жилой. Например, в количестве света, потребляемом коммерческим сектором, доля ламп накаливания составляет 5,2%, люминесцентных – 79,8% и высоко-

интенсивных (HID) – 15,1%. Суммарно доля высокоэффективных источников составляет 94,8% потребляемого коммерческим сектором освещения. Для сравнения, жилой сектор гораздо больше света получает от низкоэффективных ламп накаливания, а доля люминесцентного и других высокоэффективных источников света составляет всего 13%.

2. Сравнительный анализ основных типов ламп, применяемых для освещения

В 20 в. существовало два основных вида источников света – лампы накаливания и газоразрядные лампы, среди которых главное место занимают люминесцентные лампы. В быту традиционно наиболее распространены лампы накаливания мощностью от 15 до 300 Вт.

Эффективность ламп накаливания не превышает 5% и составляет 15 лм/Вт, т.к. основная электрическая мощность затрачивается на тепло. Срок службы ламп накаливания составляет 750–1000 часов.

Люминесцентные лампы применяются для освещения общественных и производственных помещений, таких как медицинские и образовательные учреждения, вокзалы, цеха промышленных предприятий и т.д.

К достоинствам люминесцентных ламп относятся высокая световая отдача (до 80 лм/Вт) и большой срок службы (до 10 000 час.).

Недостатками люминесцентных ламп являются:

- относительная громоздкость;
- необходимость в специальном пускорегулирующем устройстве (стартере и дросселе) и чувствительность пуска к температуре окружающего воздуха;
- наличие стробоскопического эффекта, нарушающего правильность восприятия объекта, особенно при движении, и вызывающего неприятные ощущения;
- ухудшение экологии и большие средства, которые должны быть затрачены на утилизацию содержащих ртуть баллонов.

Остановимся на проблеме экологической безопасности более подробно.

Предельно допустимое содержание паров ртути в воздухе составляет 0,03 мг/м³. В одной люминесцентной лампе содержится 100 мг ртути. При повреждении одного баллона предельное содержание паров ртути будет превышено в помещении объемом 30 000 м³.

Разработанные в 70-80-х гг. светодиоды, цифровые индикаторы, табло, экраны и элементы шкалы на основе бинарных соединений и твердых растворов А³В⁵ нашли широкое применение в устройствах и приборах индикации, сигнализации, контроля и отображения информации малой мощности как гражданского, так и спецприменения. Помимо «грязного» цвета свечения, не соответствующего стандартам, эти светодиоды имели низкую эффективность и силу излучения – единицы или десятки милликанделл, тогда как в обычных светотех-

нических устройствах этот параметр должен составлять тысячи и десятки тысяч канделл.

Ситуация радикальным образом изменилась в середине 90-х г., когда за рубежом, в основном в Японии и США, были созданы эффективные полупроводниковые источники излучения, в принципе способные заменить лампы накаливания и люминесцентные источники в светотехнических приборах большого радиуса действия, таких как шоссе-ные и железнодорожные светофоры, бакены и маяки, бортовые сигнальные и осветительные огни, дополнительные сигналы торможения, дорожные знаки, информационные табло на основе твердых растворов алюминия, индия, галлия фосфора и нитрида галлия [5, 7, 8, 11, 12, 14, 15].

Основными преимуществами СД перед остальными источниками света являются:

- высокая световая отдача, которая в настоящее время составляет 50 лм/Вт у серийных СД и 80–100 лм/Вт у лучших лабораторных образцов;
- возможность формирования светового потока в любом заданном угле от 3° до 4π;
- экономия электроэнергии при использовании вместо ламп накаливания, а в перспективе – вместо электролюминесцентных ламп;
- надежность и большой срок службы, достигающий 100 000 часов;
- чистота и широкий спектр цветов от красного до синего с заданной длиной волны;
- регулируемая интенсивность;
- низкое рабочее напряжение;
- экологически чистое производство и отсутствие проблем с утилизацией;
- высокая устойчивость СД к механическим воздействиям и работоспособность в широком диапазоне температур;
- высокая пожаро- и взрывобезопасность;
- высокая устойчивость к действию проникающей радиации.

Анализ преимуществ и недостатков ламп накаливания, люминесцентных ламп и светодиодов, а также областей применения последних позволяет систематизировать результаты по базовым характеристикам, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение различных типов источников освещения по базовым характеристикам

Тип лампы	Стоимость	Расходы за период эксплуатации	Срок службы, час.	Эффективность, лм/Вт
Лампа накаливания	Низкая	Очень высокие	1 000	15
Лампа люминесцентная	Высокая	Приемлемые	10 000	80
Лампа светодиодная	Очень высокая	Низкие	Более 100 000	50

Из приведенной таблицы следует, что СД за счет низкого расхода финансовых средств в течение всего периода эксплуатации, длительного жизненного цикла, высокой эффективности, отсутствия инфракрасного и УФ излучения являются лидерами в рейтинге источников освещения. Более высокая начальная стоимость окупается большим сроком службы. Одна полупроводниковая лампа способна заменить 100 ламп накаливания и 10 электролюминесцентных ламп.

Постоянно растущие потребности человечества в освещении требуют увеличения производства электроэнергии.

Для этого необходимы дополнительные капиталовложения на строительство электростанций, выработку месторождений энергоносителей и последующую утилизацию растущих отходов производства.

Вопрос об альтернативных высокоэффективных источниках освещения, способных удовлетворить спрос на освещение, не наращивая при этом производство и затраты на электроэнергию, стоит очень остро. Главными условиями применения новых источников являются небольшой размер ламп, долговечность и низкое энергопотребление. Именно светодиоды, отвечающие всем этим требованиям, считаются основным претендентом на замену ламп накаливания и люминесцентных. В то время, как существующие на сегодняшний день традиционные источники освещения достигли своей максимальной световой эффективности, светодиоды приблизились только к 10% своих возможностей.

Основными преимуществами светодиодов перед лампами накаливания является долгий срок службы, более высокий световой выход, безопасность, отсутствие нагревания. Светодиоды испускают чистый белый свет, в то время как лампы накаливания излучают и в инфракрасном спектре. Почти 95% электричества, потребляемого лампами накаливания, уходит в тепло, поэтому для помещений, в которых используется большое количество ламп накаливания, требуется проводить дополнительные работы по кондиционированию и охлаждению воздуха. Лампы накаливания потребляют на 80% больше электроэнергии, чем светодиоды, для них требуется высокое напряжение. Ежегодная потребность в лампах накаливания составляет 8 млн. штук (по 6 ламп на одного потребителя).

Сравнивая светодиоды с люминесцентными лампами, следует отметить, что на сегодняшний момент световая эффективность белых светодиодов ниже, чем у люминесцентных ламп, а цена – выше. Однако следует учитывать тот факт, что для большинства случаев, где применяются в настоящее время люминесцентные лампы, по техническим показаниям и условиям эксплуатации выгоднее и безопаснее использовать именно светодиодное освещение. К примеру, в угледобывающих шахтах, если происходит бросок напряжения, люминесцентная лампа гаснет немедленно. Точно так же ведут себя лампы при любом отклонении

от норм эксплуатации – при тряске или понижении температуры воздуха.

Кроме того, использованные люминесцентные лампы после завершения срока эксплуатации должны быть подвергнуты обязательной утилизации, как ртутьсодержащие отходы (PCO). Для справки: ежегодно в России на 1 млн. населения приходится около 80 000 отработанных люминесцентных ламп (или 16 тонн PCO). Нетрудно подсчитать, что ежегодные расходы только на утилизацию люминесцентных ламп для России должны составлять сумму порядка 17 млн. рублей [16]. Светодиоды, как твердотельные источники света, не содержат стекла, нитей накаливания или сменных деталей, их невозможно разбить, и они не чувствительны к любым изменениям в электросетях.

Для жилого сектора потребителей главным аргументом в пользу выбора источника освещения является его начальная цена. Перспектива будущей экономии средств на обслуживание и электроэнергию является мало убедительной. Этим объясняется малый процент применения ламп с высокой эффективностью в общем освещении жилых объектов. Использование светодиодного освещения в этом секторе может иметь место только при наличии у потребителя таких специфических требований к освещению, как направленность светового потока и чистота цвета. Только в таких случаях высокая начальная стоимость светодиодных ламп не играет существенной роли.

В то же время, промышленный и коммерческий секторы, где в основном применяется люминесцентное освещение, наоборот заинтересованы в приобретении более экономичных и долговечных источников света высокой эффективности. Деятельность этих секторов рассчитана на перспективу, и поэтому снижение расходов на обслуживание, безопасность и низкие энергетические затраты имеют первостепенное значение, закладываются в долгосрочные проекты и влияют на прибыль в целом.

Светодиоды и светодиодные устройства особенно перспективны для использования в атомной промышленности, ядерной энергетике, космической и бортовой аппаратуре вследствие стойкости параметров при длительной наработке и высокой радиационной стойкости.

Проведенные нами приоритетные исследования показали, что двукратное снижение силы света зеленых, синих и белых СД имеет место при флюенсах нейтронного облучения 10^{14} – 10^{15} н/см² (энергия 0,1–2,43 МэВ), дозы электронного (4 МэВ) и гамма облучения (1,25 МэВ) 10^6 – 10^7 рад [17]. Светодиоды на основе фосфида галлия индия алюминия имеют несколько меньшую радиационную стойкость, однако превосходят по этому параметру СД первого поколения на основе твердых растворов арсенида фосфида галлия и арсенида галлия алюминия [18].

Прогнозируемое изменение силы света при наработке в течение 100 000 часов составляет 17%, что незаметно при визуальном наблюдении (прогноз

сделан по результатам испытаний в течение 30 000 час.) [19].

Приборы также показывают повышенную стойкость к действию агрессивных веществ как в атмосфере, так и в водных растворах [19].

3. Развитие рынка белых светодиодов (СД) и светодиодных устройств (СДУ)

Начиная с 2000 г., темпы роста рынка СД за последние 5 лет превышали 58 % в год, а объем выпуска белых СД составил около 50 % всего объема выпуска (рис. 2).

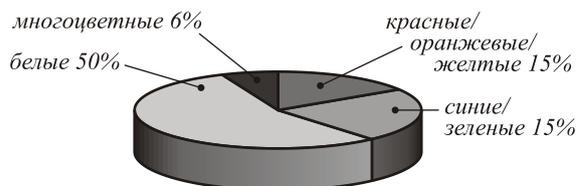


Рис. 2. Относительные объемы выпуска СД и светодиодных устройств (СДУ) различного цвета в 2004–2007 гг.

Объемы выпуска СД и СДУ в промышленно развитых странах в 2003–2007 гг. (млн. шт.) приведены в табл. 3.

Таблица 3. Объемы выпуска СД и СДУ в промышленно развитых странах в 2003–2007 гг. (в млн. шт.)

Страна \ Год	2003	2004	2005	2006	2007
Япония	2468	3032	3790	4548	5757
США	527	654	811	1005	1245
Тайвань	857	1062	1351	1677	2097
Южная Корея	394	472	566	677	815
Европа	461	599	778	1012	1316
Китай	300	350	420	625	4200

В табл. 4 приведены ежегодные капиталовложения, число патентов и основные фирмы-производители в 2003–2007 гг.

Начиная с 2004 г., более половины капиталовложений направляется на производство белых СД, т.е. на освещение.

Обеспечение рынка светодиодов высокой яркости осуществляется несколькими признанными крупными поставщиками, а также рядом недавно появившихся более мелких. Доминирующими поставщиками на рынок голубых, зеленых и белых светодиодов, основанных на нитриде галлия индия (InGaN), являются компании Nichia Corporation, Toyota Gosei, Cree и Osram Opto Semiconductors. Основные поставщики желтых, оранжевых и красных светодиодов, основанных на фосфиде галлия индия алюминия (InGaAlP), – это компании Agilent Technologies и Lumileds Lighting (первая из них является совместным предприятием с Philips Lighting), Osram Opto Semiconductors, Toshiba, Epistar, поставщики

чипов с Тайваня. Появление новых поставщиков, таких как AHT и Uniroyal Optoelectronics и ряда новых тайваньских, южно-корейских и китайских фирм, сделает в предстоящие годы картину конкуренции в значительной степени непредсказуемой.

Таблица 4.

	Япония	США	Европа	Китай
Планируемые ежегодные капиталовложения в производство «белых» СД, (млн. \$)	10,7 в 1998- -2003 гг.	50 в 2002- -2011 гг.	0,98 в 1997- -2000 гг.	326 в 2003- -2005 гг.
Число патентов по технологии «синих» СД	570	324	29	0
Основные фирмы-производители	Nichia Corp., Toyota Gosei, Osram Opto Semic., Toshiba	Limiteds lighting, Gree, Agilent technolog.	Osram Opto Semic.	

Хотя светодиоды высокой яркости проникают во все секторы рынка, некоторые из областей их применения стоят особняком, поскольку становятся реально возможными только при наличии этой технологии. Например, крупноразмерные полноцветные наружные светодиодные вывески стали реальностью только в середине 90-х годов после того, как светодиоды высокой яркости были разработаны для всех трех основных цветов – красного, зеленого и синего. Рекламно-информационные табло являются яркими, цветными и могут легко принимать полноценное видео изображение. Использование светодиодов высокой яркости в автомобильных лампах стоп-сигналов получило существенное распространение в США, Европе и Японии. Так, в 2000 году ими были оборудованы уже 32% всех легковых автомобилей и легких грузовиков по всему миру. Начиная с 1997 года, на значительной части европейских автомобилей начали использовать голубые, зеленые, белые и желтые светодиоды высокой яркости для освещения приборных досок, и сегодня более половины сделанных в Европе автомобилей (например, Audi, BMW и Mercedes) оборудованы ими.

Светодиодные транспортные сигналы высокой яркости испытали значительный взлет на рынке в середине 90-х годов. Использование более дорогих светодиодов для замены ламп накаливания в транспортных сигналах основаны на их высокой надежности, а также на том, что светодиоды потребляют электроэнергию на 80% меньше, чем лампы накаливания с фильтрами, и могут работать при меньшем напряжении.

В последние годы использование СД высокой яркости для подсветки жидкокристаллических (LCD) цветных дисплеев внесло существенный вклад в развитие рынка последних [20]. Конкурентами СД в этой области является электролюминесцентная (EL) подсветка и подсветка флуоресцентными лампами с холодным катодом (CCFL). Потребление энергии при EL подсветке относительно невелико (~ 30 мВт), однако для нее необходим источник переменного напряжения 80–150 Вт с частотой 60–1000 Гц. Диапазон рабочих температур от 0 до 50°C. Срок жизни EL подсветки (снижение яркости наполовину) составляет 3–5 тыс. часов. Для работы флуоресцентных CCFL ламп необходимы преобразователи на частоту 40 кГц с выходным напряжением 270–300 В. Они потребляют электрическую мощность 1,5 Вт при рабочем токе 5–6 мА. Срок службы 10–15 тыс. часов.

Отличительными особенностями светодиодной подсветки являются:

- низкое напряжение питания;
- отсутствие необходимости использования специальных преобразователей, как, например, в EL и CCFL подсветке;
- ток потребления составляет от 30 до 200 мА и более в зависимости от размера дисплея;
- цвет подсветки красный, желто-зеленый и белый, чаще желто-зеленый, эффективность которой выше, чем при EL подсветке;
- подсветка на белых СД позволяет достигнуть цветопередачи ЖК дисплея 75% по шкале NTSC, что превышает диапазон цветопередачи CCFL ламп;
- при использовании для подсветки многоцветных RGB ламп (см. ниже) воспроизведение цветов может составить 100%, что улучшает качество изображения;
- срок службы СД превышает 100 000 часов;
- отсутствует генерация шумов.

В отличие от EL и CCFL подсветки светодиодная подсветка осуществляется полупроводниковыми приборами, которые могут работать от источника постоянного напряжения 5 В без использования преобразователей, допускают возможность регулировки координат цветности, быстрой регулировки яркости и могут работать как на постоянном, так и переменном токе и в импульсном режиме.

Срок службы светодиодной подсветки составляет более 100 000 часов, в десятки раз превышая срок службы CCFL и EL ламп.

Таким образом, в области подсветки ЖК дисплеев СД уверенно идут на смену электролюминесцентным лампам и лампам с холодным катодом.

4. Принципы создания, элементы конструкции и технологии светодиодов и светодиодных устройств белого цвета свечения (полупроводниковых ламп)

4.1. Принципы создания источников белого цвета

В технике используются два основных принципа получения сложных цветов, в том числе и белого.

Первый метод – аддитивный, т.е. сложение трех основных компонент цвета: красного (R), зеленого (G) и синего (B). Этот метод подчиняется колориметрическому закону Грассмана [21], запись которого обычно приводится в следующем виде:

$$W = aR + bG + cB,$$

где R, G, B – цвета красного, зеленого и синего поддиапазонов, тогда как a, b, c – их энергетические доли в суммарном белом цвете. Эти доли не равны и составляют для системы SEKAM цветного телевидения соответственно a = 25÷30%, b = 60÷65%, c = 5÷10%.

Второй метод – субтрактивный, когда сложный цвет получают вычитанием (или флотрацией) из нескольких.

Первый из этих методов нашел применение в информатике и телевидении, второй – в светотехнике, полиграфии и текстильном производстве. Качество белого цвета, воспроизводимого двумя этими методами, очень высокое, коэффициент цветовоспроизведения R > 90 единиц.

Наряду с этими методами получения белого цвета большое распространение получил аддитивный вариант с использованием принципа дополнительных цветов И.Ньютона, гласящего, что находящиеся на разных концах одного диаметра диаграммы цветности (рис. 3) в сумме создадут белое излучение. Несмотря на кажущуюся простоту, этот вариант потребовал при его реализации детального согласования спектров и интенсивностей двух дополнительных цветов. До настоящего времени метод дополнительных цветов используется в практике черно-белых кинескопов [21], при создании отдельных видов люминесцентных ламп и т.д. Обычно выбирают следующие пары дополнительных цветов: синий и желтый, голубой и оранжевый, зеленый и красный и т.д.

Принципиально задачу создания белого СД можно решать несколькими способами:

- использованием трех гетероструктур, излучающих в красной (R), зеленой (G) и синей (B) области спектра с последующим смешением цветов в необходимой пропорции;
- использованием одной гетероструктуры, излучающей в синей или УФ области спектра, и стоксова люминофора, излучающего в желто-зеленой или красно-оранжевой области спектра, с последующим рассеиванием и смешением дополнительных цветов по принципу И. Ньютона.

Более эффективным оказался второй метод, на анализе которого остановимся более подробно.

В колориметрической системе Международной Комиссии по освещению (МКО1931) [21] цвет, создаваемый синим излучателем (InGaN-гетеропереходом), располагается в левом нижнем углу (рис. 3). Его координаты X = 0,11 (0,12), Y = 0,03 (для λ = 455 нм). По принципу дополнительных цветов сопряженный цвет должен находиться на пересечении прямой, проходящей через точку B (x_B = 0,11, y_B = 0,03) и точку W (x_W = 0,31, y_W = 0,32)

с локусом (огibaющей) колориметрической системы МКО. Эта точка находится в области чистых цветов с λ = 565÷562 нм (рис. 3). Это один из возможных вариантов определения дополнительного цвета.

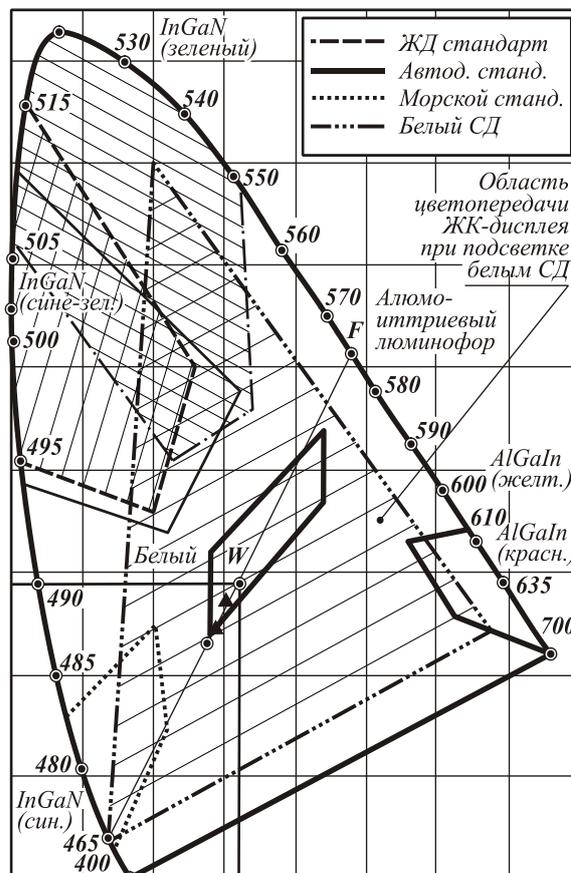


Рис. 3. Цветовой график МКО 1931 с локусами (огibaющими) спектрально чистых цветов и зонами, соответствующими белому свету с различной цветовой температурой, железнодорожному, автодорожному и морскому стандартам, цветопередаче жидкокристаллического дисплея при подсветке белым СД

Второй заключается в использовании цветового равенства

$$\left[(x_W - x_B)^2 + (y_W - y_B)^2 \right]^{1/2} \cdot \eta_B = \left[(x_W - x_Y)^2 + (y_W - y_Y)^2 \right]^{1/2} \cdot \eta_Y,$$

где x_W, y_W – координаты цветности опорного белого цвета;

x_B, y_B – координаты цветности излучения СД;

x_Y, y_Y – определение координаты цветности сопряженного (дополнительного) желтого излучения фотолюминофора;

η_B – светоотдача синего СД;

η_Y – светоотдача желтого излучения люминофора.

Первый вариант определения – графический – более удобен, но менее точен. Второй – расчетный – требует вариации параметров световой отдачи излучения СД и желтого люминофора.

4.2. Элементы конструкции и технологии изготовления белых СД

В RGB-методе три кристалла с рассеивателем размещаются на основании из текстолита и прикрепляются к кристаллодержателю токопроводящим клеем или мягким припоем.

Изолированных выводов может быть по числу кристаллов с отдельной коммутацией. Например, таким образом можно сделать полноцветный СД, монтируя гетероструктуры с красным, зеленым и синим излучением. Оптическая система состоит из специальной линзы с рефлектором, собирающим боковое излучение кристалла, и может давать различное светораспределение и заполнение апертуры. Топология основания предполагает применение моноблоков, состоящих из нескольких линз. Линзовая крышка имеет направляющие штыри, которые соответствуют позиционным отверстиям в основании. В случае необходимости сочленение изготовленных с необходимой точностью основания и линзовой крышки может обеспечить прецизионное совпадение оптической и физической осей прибора при монтаже СД на плоскопараллельную поверхность. Это особенно важно при производстве СД с узконаправленной диаграммой излучения (менее 5°).

Основание также служит радиатором, отводящим тепло, излучаемое кристаллами. Между основанием и линзовой крышкой вокруг кристаллов находится полимерный компаунд, имеющий такое же тепловое сопротивление, что и линзовая крышка, выполненная из поликарбоната. Данная конструкция позволяет увеличить рабочий ток СД до 350 мА, а с применением специальных радиаторов потребляемый ток можно поднять до 1 А с сохранением линейности люмен-амперной характеристики и расширить диапазон рабочих температур до $-60^{\circ}\text{C} \div +80^{\circ}\text{C}$.

Во втором варианте люминофор располагается на излучающей поверхности гетероперехода [23].

Первоначально предполагалось сформировать пленочное покрытие из зерен люминофора на основной излучающей поверхности гетероперехода размером 100×100 мкм или 200×200 мкм. Но оказалось, что доля площади непокрытых излучающих граней кристалла составляет 10–15%, что дает в суммарном излучении нескомпенсированное излучение. Необходимо было разработать конструкцию и технологию изготовления СД, которые исключали возможность оставления участков поверхности гетероструктуры, не покрытых пленкой компаунда с люминофором, и обеспечивали нанесение пленки компаунда с люминофором одинаковой по толщине [24–27].

Для получения однородного белого излучения без разложения его на синюю и желтую составляющие третьим компонентом в состав люминофорно-полимерной композиции вводился оптический рассеиватель из неорганических материалов с высоким коэффициентом отражения (SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2). Оптимальные результаты были получены при соотношении удельных поверхностей зерен фотолюминофора и оптического рассеивателя как $4 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{Г} : 100 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{Г}$.

На основе колориметрического расчета было установлено, что люминофор должен удовлетворять следующим требованиям:

- длина волны максимума спектра желтого излучения $\lambda_{\text{max}} = 560 \pm 5$ нм;
- световой эквивалент спектра излучения (люмен-эквивалент) не менее 300 лм/Вт;
- полуширина спектра излучения $\Delta\lambda$ от 115 нм до 130 нм (при большем значении уменьшается люмен-эквивалент, при меньшем значении – величина цветовоспроизведения).

Очень важным является спектральное согласование двух спектров: излучения синего гетероперехода и спектра желтой полосы фотолюминесценции излучающего материала.

Были синтезированы первые неорганические отечественные люминофоры для белых СД. Фотолюминофор был изготовлен на основе твердых растворов алюмогранатов иттрия и гадолиния. Для их активации добавляли Ce^{+3} и Pr^{+3} . Краткие характеристики люминофора ФЛИС-7 приведены в табл. 5.

Таблица 5. Основные характеристики люминофора ФЛИС-7 для белых СД

Химический состав	Иттрий-алюминиевый алюмогранат, активированный Се и Pr. Формула (Y, Gd, Ce, Pr) ₃ Al ₅ O ₁₂
Кристаллические структуры	Кубическая пространственная группа J
Количество атомов в элементарной ячейке	24
Параметр элементарной ячейки A	12,1
Плотность Г/см ³	5,25÷5,35
Координаты свечения	x = 0,52 y = 0,42÷0,44
Длина волны максимума излучения, нм	$\lambda = 552 \div 565$ нм
Дисперсность	d ₅₀ = 2÷6 мкм d ₉₀ = 16 мкм d ₁₀₀ = 20 мкм

Спектр свечения СД, содержащих гетероструктуру синего цвета, иммерсную среду с люминофором ФЛИС-7 и рассеивателем, приведен на рис. 4.

Для получения более теплых оттенков белого цвета в спектре в люминофор был введен ион Pr^{+3} с $\lambda = 610$ нм. При решении всех колориметрических и оптических задач по созданию белых СД новые люминофоры типа ФЛИС на основе алюмоиттрий-гадолиниевых гранатов позволили достигнуть:

- очень высокой световой отдачи – до 50 лм/Вт, у лучших лабораторных образцов до 100 лм/Вт;
- большого постоянства цвета излучения в выбранном поддиапазоне оттенков белого (холодный, дневной, теплый);

- очень высокой силы света как для узкоградусных приборов (> 100 Кд), так и в широкоградусном варианте (> 29 Кд);
- высокой стабильности излучения в процессе срока службы прибора.

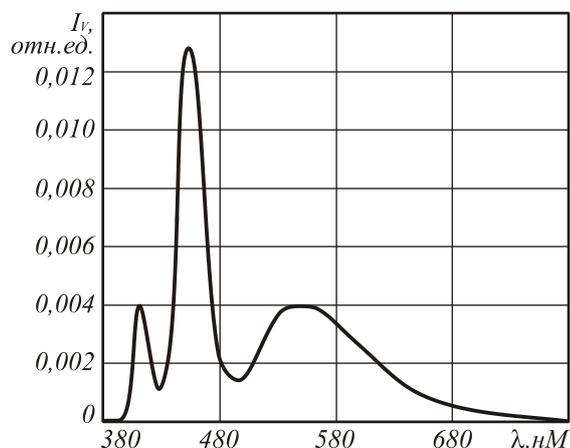


Рис. 4. Спектр свечения «белого» СД

При разработке светодиодных устройств на базе СД необходимо учитывать следующее обстоятельство.

Лампа накаливания мощностью 100 Вт, обладающая эффективностью 15 лм/Вт, способна производить световой поток 1500 лм. То же количество света будет производить люминесцентная лампа мощностью 20 Вт при эффективности 80 лм/Вт.

Для адекватной замены лампы накаливания полупроводниковой лампой при эффективности последней 50 лм/Вт ток через СД должен составлять 6 А при напряжении 5 В. Современные эффективные мощные СД способны работать при токе 0,35-1,0 А. Следовательно, полупроводниковая лампа мощностью 100 Вт, являющаяся аналогом лампы накаливания, должна содержать как минимум шесть СД, объединенных в одну конструкцию механически, электрически и оптически. То же самое относится к другим светодиодным устройствам, в частности, к полупроводниковым аналогам люминесцентных ламп.

На основе проведенных исследований был разработан ряд конструктивно различных полупроводниковых ламп (рис. 5-7) с параметрами, представленными в табл. 6.

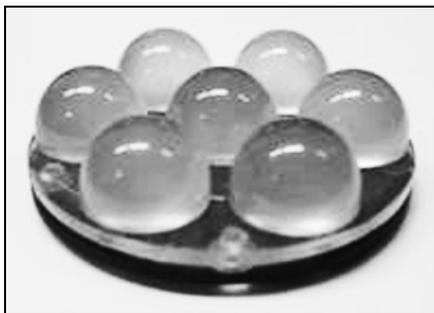


Рис. 5. Элемент конструкции полупроводникового аналога лампы накаливания



Рис. 6. Элемент конструкции полупроводникового аналога электролюминесцентной лампы

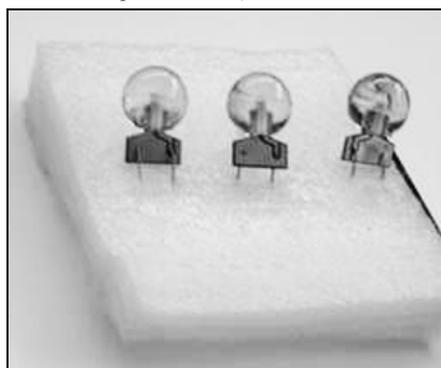


Рис. 7. Полный полупроводниковый аналог лампы накаливания, излучающий в угле 4πстерадиан

Таблица 6. Параметры белых ламп

Наименование	Координаты цветности	Световой поток, лм
ИПМ – 6П	0,31×0,31, угол излучения 160°×50°	300
ИПМ – 3П	0,31×0,31, угол излучения 100°×40°	160
ИПМ – 3 М	0,31×0,31, угол излучения 100°×40°	300
ИПМ – 3 Б	0,31×0,31, угол излучения 100°×40°	200
ИПМ – 4π	0,31×0,31, угол излучения 4π	20

Литература

1. **Берг, А.** Светодиоды. / А. Берг, П. Дин – М.: Мир, 1979. – 450 с.
2. **Круглов, И.И.** Разработка промышленной технологии и организация выпуска единичных и матричных светодиодов на основе карбида кремния / И.И. Круглов, В.И. Павличенко, И.В. Рыжиков // В сб. трудов III Всесоюзной конференции по полупроводниковому карбиду кремния, М., 1970. – С.276 - 290.
3. **Круглов, И.И.** Карбидокремниевые светодиоды / И.И. Круглов, В.И. Павличенко, И.В. Рыжиков // Электронная промышленность, 1972. – № 7. – Вып. 7 (13). – С.34-42.

4. **Акимов, Ю.С.** Полупроводниковые знаковые индикаторы с красным цветом свечения / Ю.С. Акимов, И.В. Рыжиков // Тезисы докладов на V Всесоюзном совещании по электролюминесценции, Ставрополь, 1973. – С.83-84.
5. Lumileds. Preliminary Application Note P01/ Lumileds custom Luxeon. 2002. № 1-2. P.1-20.
6. **Алферов, Ж.И.** История и будущее полупроводниковых гетероструктур / Ж.И. Алферов // Физика и техника полупроводников, 1988. – Т. 32, № 1. – С.3-18.
7. **Оmano, Н.** / Н. Omano [and other] // Jap. Appl. Phys. 1989. – V. 28. – P.2112-2114.
8. **Nakamura, S.** The blue laser diode GaN based light Emitters and lasers / S. Nakamura, S. Pearton, G. Fasol – Springer, 1997. – P.1112-2114.
9. **Юнович, А.Э.** Ключ к синему лучу / А.Э. Юнович // Химия и жизнь, 1999. – № 5-6. – С.46-48.
10. **Pearson, S.Y.** GaN processing, defects and devices / S.Y. Pearson // J. Appl. Phys., 1999. – V.38, N1. – P.1-78.
11. **Волков, В.** Мощные полупроводниковые источники излучения / В. Волков [и др.] // Электроника: наука, технология, бизнес, 1999. – №3. – С.16-21.
12. **Nakamura, S.** et. Japan Journal of Appl. Phys. 1995. – #34. – P.1832-1838.
13. **Алферов, Ж.И.** Письма в журнал технической физики. 1997. – № 3. – С.657-659.
14. **Hodapp, M.W.** High brightness light emitting diodes / M.W. Hodapp // New York. NY. Academic press. 1997. – P.87-92.
15. **Craford, George M.** Visible light emitting diodes: past, present and very bright future / George M. Craford // MRS bulletin. 2000. – № 1. – P.113-118.
16. <http://www.mtek.ru/press>.
17. **Абрамов, В.С.** Воздействие нейтронного и гамма облучения на сверхяркие гетероструктуры на основе нитрида галлия, индия, алюминия зеленого и синего цвета свечения / В.С. Абрамов, И.В. Рыжиков, В.Н. Щербаков // В сб. трудов МНТК «Информационные технологии в науке, технике и образовании». М: МГАПИ, 2005. – Т. 3. – С. 57-73. – ISBN-8968-0305-8
18. **Абрамов, В.С.** Исследование воздействия нейтронного и гамма облучения на вольт-люмен-амперные характеристики и параметры активной области мощных сверхярких $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}In_{0,5}P$ с красным и желтым цветом свечения / В.С. Абрамов [и др.] // В сб. трудов МНТК «Информационные технологии в науке, технике и образовании». М: МГАПИ, 2005. – Т. 3. – С.42-56. – ISBN5-8068-0305-8.
19. **Щербаков, В.Н.** Исследование надежности и диагностика светодиодов на основе гетероструктур $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}In_{0,5}P$ и $(Al_xGa_{1-x}N)/(In_yGa_{1-y}N)/GaN$ всех основных цветов / В.Н. Щербаков // В сб. трудов МНТК «Информационные технологии и моделирование приборов и техпроцессов в целях обеспечения качества и надежности». М: МГУПИ, 2006. – Т.3. – С.65-74. – ISBN 5-8068-03444-9.
20. http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/0_06/stat_18.htm
21. **Мешков, С.П.** Основы светотехники. / С.П. Мешков – М.: Техническая литература, 1960. – Т. 1,2. – 230 с.
22. **Шмаков, П.В.** Телевидение. / П.В. Шмаков – М.: Связьиздат, 1965. – 328 с.
23. **Абрамов, В.С.** Белые светодиоды / В.С. Абрамов [и др.] // Светодиоды и лазеры, 2002. – № 1-2. – С.25-28.
24. **Гридин, В.Н.** Полупроводниковая лампа – новый, эффективный, надежный и экологически чистый источник освещения / В.Н. Гридин, И.В. Рыжиков, В.Н. Щербаков // Экология промышленного производства. 2007. – № 4, октябрь. – С. 48-52.
25. **Щербаков, В.Н.,** Основные проблемы создания источников освещения на базе инжекционной люминесценции, альтернативных лампам накаливания и люминесцентным лампам / В.Н. Щербаков, В.С. Абрамов, И.В. Рыжиков // Приборы, 2007. – № 5. – С. 45-56.
26. **Рыжиков, И.В.** Новый эффективный источник освещения – полупроводниковая лампа с люминофором / И.В. Рыжиков, В.Н. Щербаков // В сб. трудов МНТК «Информационные технологии в науке, технике и образовании». М: МГУПИ, 2007. – Том II. – С.36-46.
27. **Гридин, В.Н.** Полупроводниковая лампа – источник освещения будущего / В.Н. Гридин, И.В. Рыжиков, В.Н. Щербаков // Автоматизация в промышленности, 2007. – № 7. – С.63-65.

THE SEMICONDUCTOR LIGHT IS THE LIGHT SOURCE, AN ALTERNATIVE TO INCANDESCENT LAMPS, AND ELECTROLUMINESCENT LAMPS

V.N. Gridin¹, I.V. Ryzhikov¹, V.S. Vinogradov², V.N. Scherbakov³

¹ DITC RAS, Odintsovo, Russia,

² The Moscow state university of instrument making and computer science, Moscow, Russia,

³ "POLA+", Moscow, Russia

Abstract

The composition light and electrical characteristic and parameter vacuum. electroluminescent and semiconductor lamps, illuminated white light has been made.

The white light semiconductor lamps get by mixing blue electroluminescence InGaN heterostructure and yellow photoluminescence alumo-ittrey granat.

The main advantage of semiconductor lamps were high quantum efficiency, long life time, (more 100 000 hour), ecology safety and radiational hardness.

The construction and technology elements semiconductor lamps – analogs vacuum and electroluminescent sources of illumination – has been described.

Key words: light emitting diod, vacuum and electroluminescent sources of illumination, heterostructure, electro- and photoluminescence.

Citation: Gridin VN, Ryzhikov IgV, Vinogradov VS, Scherbakov VN. The semiconductor light is the light source, an alternative to incandescent lamps, and electroluminescent lamps. Computer Optics 2008; 32(4): 375-83.

References

- [1] Berg A, Din P. Light-emitting diodes. Oxford: Clarendon Press, 1976
- [2] Kruglov II, Pavlichenko VI, Ryzhikov IV. The development of industrial technology and the release of single and matrix light emitting diodes based on silicon carbide [In Russian]. Moscow: Proceedings of the III Russian Conference on Semiconductor Silicon Carbide 1970; 276-290.
- [3] Kruglov II, Pavlichenko VI, Ryzhikov IV. Silicon carbide light emitting diodes [In Russian]. Electronics Industry 1972; 7(13): 34-42.
- [4] Akimov YuS, Ryzhikov IV. Semiconductor red light emitting sign indicators [In Russian]. Stavropol: Scientific Abstracts at the V All-Union Meeting on Electroluminescence 1973; 83-84.
- [5] LumiLeds. Preliminary Application Note P01/ Lumileds custom Luxeon 2002; 1-2: 1-20.
- [6] Alferov ZhI. The History and future of semiconductor heterostructures [In Russian]. Semiconductors 1988; 32(1): 3-18.
- [7] Omano H. [and other]. Jap. Appl. Phys. 1989; 28: 2112-2114.
- [8] Nakamura S, Pearton G. Fasol. The blue laser diode GaN based light Emitters and lasers. Springer 1997: 1112-2114.
- [9] Yunovich AE. The key to blue light [In Russian]. Khimiya i Zhizn' (Chemistry and Life Science) 1999; 5-6: 46-48.
- [10] Pearson SY. GaN processing, defects and devices. J. Appl. Phys. 1999; 38(1): 1-78.
- [11] Volkov V, Zakgeym A, Itkinson G, Mizerov M, Pushniy B. Power semiconductor light sources [In Russian]. Electronics: Science, Technology, Business 1999; 3: 16-21.
- [12] Nakamura S. Japan Journal of Appl. Phys. 1995; 34: 1832-1838.
- [13] Alferov ZhI. Technical Physics Letters 1997; 3: 657-659.
- [14] Hodapp MW. High brightness light emitting diodes. New York, Academic press 1997: 87-92.
- [15] Craford George M. Visible light emitting diodes: past, present and very bright future. MRS bulletin 2000; 1: 113-118.
- [16] <http://www.mtek.ru/press>.
- [17] Abramov VS, Ryzhikov IV, Shcherbakov VN. Influence of neutron and gamma irradiation on high-brightness heterostructures based on gallium nitride, indium, green and blue light emitting aluminium [In Russian]. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Information Technology in Science, Engineering and Education." Moscow: "MGAPI" Publisher (Moscow Technological University, MREA) 2005; 3: 57-73.
- [18] Abramov VS, et al. Study of influence of neutron and gamma irradiation on volt-lumen-ampere characteristics and active area parameters of powerful high-brightness heterostructures (Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P with red and yellow light emitting [In Russian]. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Information Technology in Science, Engineering and Education." Moscow: "MGAPI" Publisher (Moscow Technological University, MREA) 2005; 3: 42-56.
- [19] Shcherbakov VN. Reliability study and diagnostics of full-colour light emitting diodes based on heterostructures (Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P and (Al_xGa_{1-x}N)/(In_yGa_{1-y}N)/GaN [In Russian]. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Information Technology, Devices and Processes Modeling for Quality Control and Reliability." Moscow: "MGUPI" Publisher (Moscow Technological University, MREA) 2006; 3: 65-74.
- [20] http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/0_06/stat_18.htm
- [21] Meshkov SP. Basics of light engineering [In Russian]. Moscow: Technical Literature 1960; 1, 2: 230 p.
- [22] Shmakov PV. Television [In Russian]. Moscow: "Sviaz' izdat" Publisher 1965; 328 p.
- [23] Abramov VS, et al. White LEDs [In Russian]. LEDs and Lasers 2002; 1-2: 25-28.
- [24] Gridin VN, Ryzhikov IV, Shcherbakov VN. The semiconductor lamp is a new, efficient, reliable, and environmentally clean source of illumination [In Russian]. Industrial Ecology 2007; 4: 48-52.

- [25] Shcherbakov VN, Abramov VS, Ryzhikov IV. The main problem of creating a source of illumination based on the injection luminescence, alternate incandescent and fluorescent lamps [In Russian]. *Instruments* 2007; 5: 45-56.
- [26] Ryzhikov IV, Shcherbakov VN. A new efficient source of illumination is a semiconductor lamp phosphor [In Russian]. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Information Technology in Science, Engineering and Education." Moscow: "MGUPI" Publisher (Moscow Technological University, MREA) 2007; 2: 36-46.
- [27] Gridin VN, Ryzhikov IV, Shcherbakov VN. The semiconductor lamp source is the future of lighting [In Russian]. *Automation in Industry* 2007; 7: 63-65.