

УДК

С.Н. Маркова, И.С. Матешев, А.Н. ТуркинМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия**ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ БЕЛОГО
СВЕЧЕНИЯ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ**

Теоретически исследованы механизмы деградации сигнала в однопролетных линиях связи с канальной скоростью 100 Гбит/с и когерентным детектированием, ограничивающие предельную длину однопролетных линий. Описаны варианты построения однопролетных линий связи большой протяженности, приведены результаты их экспериментального исследования и показано хорошее совпадение с результатами расчетов. Даны оценки максимальной достижимой длины и пропускной способности рассмотренных вариантов построения однопролетных линий связи. Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что при использовании поляризационного мультиплексирования (DP), четырехуровневой фазовой модуляции (QPSK), когерентного детектирования и коррекции ошибок с мягким принятием решений (SoftFEC) в сочетании с волокном стандарта G.652, обладающим ультранизким затуханием, дальность передачи DWDM-сигналов с канальной скоростью 100 Гбит/с в однопролетных линиях связи может превышать 500 км.

Ключевые слова: DWDM-сигнал, однопролетная линия, типовая схема, рекордный эксперимент, рамановское усиление.

S.N. Markova, I.S. Mateshev, A.N. Turkin

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

VERY LONG SINGLE-SPAN FIBER OPTIC LINES

We investigated theoretically the mechanisms of degradation of signal in single-span lines with 100G channels and coherent detection, which limit a critical length of single-span lines. Variants of construction of very long single-span lines are described, the results of their experimental research are reported, and a good agreement of experimental results with theoretical calculations is shown. Critical lengths and maximal bandwidths of described variants of single-span lines are estimated. It is shown theoretically and experimentally that using DP-QPSK signal with coherent detection and SoftFEC in combination with G.652 fiber with ultra-low attenuation it is possible to transmit 100G DWDM signal over more than 500 km in a single-span line.

Keywords: DWDM signal, single-span line, typical scheme, record experiment, Raman amplification.

Введение

Вопросы стабильности и изменения характеристик полупроводниковых светодиодных структур на основе нитрида галлия стали особенно актуальными в настоящее время. Связано это с началом активного использования созданных на их основе сверхъярких и мощных

светодиодов (СД) синего, зеленого, а также белого цвета свечения в качестве основных источников излучения в светотехнических изделиях. Такие исследования начали проводиться практически сразу после появления первых сверхъярких СД на основе нитрида галлия [1–4]. Однако в большинстве своем это были исследования изменения характеристик при длительной работе цветных – синих и зеленых – светодиодов, в основе которых лежат кристаллы на базе гетероструктур нитрида галлия и его твердых растворов. Вопросам изменения характеристик белых светодиодов, где в комбинации с кристаллами на основе нитридов также используются люминофоры, во многих работах внимания практически не уделялось [5–8]. Были предложены модели старения кристаллов на основе нитрида галлия и его твердых растворов, но для белых СД не менее важным вопросом является деградация люминофора, а также системы кристалл – люминофор.

Вопрос изменения характеристик белых СД при длительном протекании тока приобретает особый интерес, поскольку белые СД на основе комбинации нитридного кристалла с люминофорами в настоящее время начали активно использоваться в качестве источников света в системах освещения и светотехнических установках [9, 10].

1. Методика эксперимента

Целью исследования старения белых СД, представленного в данной статье, является научное обоснование изменения характеристик СД, разработанных отечественными фирмами, в зависимости от времени их работы. В процессе работы проводилось изучение изменения спектров электролюминесценции, вольт-амперных характеристик (ВАХ) и зависимости относительной интенсивности излучения СД от тока через определенные промежутки времени. Параллельно проводились измерения светового потока исследуемых образцов в указанные промежутки времени и цветовых характеристик – цветовой температуры и цветовых координат.

Для исследования были выбраны три одинаковых светодиода отечественного производства, обозначенные соответствующими номерами. Образцы были из одной партии, их начальные характеристики представлены в табл. 1. Образцы № 1 и № 2 подвергались старению, № 3 оставался контрольным.

Старение образцов № 1 и № 2 проходило при токе 120 мА, что соответствует максимально допустимому значению, которое указывает

производитель. Также исследуемые светодиоды специально помещались в закрытое пространство для обеспечения повышенной температуры окружающей среды. В результате температуру *p-n* перехода исследуемых образцов в ходе эксперимента можно оценить равной приблизительно 123 °С, что очень близко максимально допустимому значению для кристаллов, используемых в данных светодиодах, которое составляет 125 °С.

Таблица 1

Заявленные характеристики светодиода

Параметр	Значение	Ед. измерения
Потребляемая мощность	1,0	Вт
Прямой ток	100	мА
Максимальный прямой ток	120	мА

Измерения проводились на автоматизированной экспериментальной установке на базе призмного монохроматора Zeiss – SPM-2, в качестве приемника излучения использовался ФЭУ-100, сигнал с которого подается на цифровой мультиметр APPA-207 и далее на СОМ-порт компьютера. Было разработано программное обеспечение управления установкой от компьютера, позволяющее проводить в автоматическом режиме спектральные измерения, измерения ВАХ и зависимости интенсивности излучения от тока. Светодиод устанавливался в держатель на оптической скамье. Спектральные измерения проводились в режиме постоянного тока, ток через светодиод и напряжение на светодиоде регистрировались цифровыми мультиметрами APPA-303, погрешность измерений составляла порядка 0,2 %. При определении интенсивности использовался кремниевый фотоэлемент, фототок в его цепи фиксировался цифровым мультиметром KEITHLEY 2000 с погрешностью $5 \cdot 10^{-8}$ – $3,5 \cdot 10^{-5}$ А в зависимости от шкалы измерения.

Конструкция исследуемого СД следующая: в корпусе, изготовленный из кремнийорганической пластмассы, помещается синий полупроводниковый кристалл на основе гетероструктуры InGaN/GaN, сверху он покрывается люминофором на основе алюмо-иттриевого граната (YAG), легированного трехвалентным церием, максимум излучения которого лежит в желто-зеленой области видимого спектра. Люминофор смешивается с оптическим гелем, образуя полимерную композицию, которой заполняется все пространство корпуса светодиода, где

помещен кристалл, и полимеризуется. Максимум спектра возбуждения YAG лежит в синей области спектра и соответствует максимуму свечения полупроводникового кристалла, с помощью которого и происходит возбуждение люминофора. Белый свет образуется путем смешения синего цвета InGaN/GaN-кристалла и желто-зеленого цвета свечения YAG-люминофора.

2. Экспериментальные результаты

Световой поток

Экспериментальные результаты изменения светового потока и цветовой температуры образцов № 1 и № 2, подвергавшихся старению, и контрольного образца № 3 представлены в табл. 2. Из таблицы видно, что значение светового потока образцов, подвергавшихся длительному протеканию тока, значительно уменьшился. Если вначале значение светового потока составляло 95 лм, то после 1700 ч работы поток составил 57 лм для образца № 1 и 48 лм – для образца № 2. Графически это представлено на рис. 1.

Важной с практической точки зрения характеристикой является цветовая температура. Графически ее изменения представлены на рис. 2.

Таблица 2

Экспериментальные результаты изменения характеристик исследуемых образцов светодиодов

Параметры		Образец № 1 Образец № 2 Образец № 3					
		250 ч	625 ч	1000 ч	1200 ч	1700 ч	
Световой поток, лм		78	73	70	68	57	
		70	68	68	61	48	
		96	96	96	96	95	
ССТ, К		5251	5335	5492	5645	5862	
		5435	5640	5603	5782	5850	
		4900	4882	4922	4912	4899	
Цветовые координаты		X	0,338	0,336	0,332	0,334	0,335
			0,333	0,329	0,330	0,332	0,326
			0,348	0,349	0,347	0,345	0,353
		Y	0,336	0,330	0,320	0,315	0,302
			0,325	0,319	0,318	0,309	0,301
			0,355	0,355	0,350	0,355	0,352

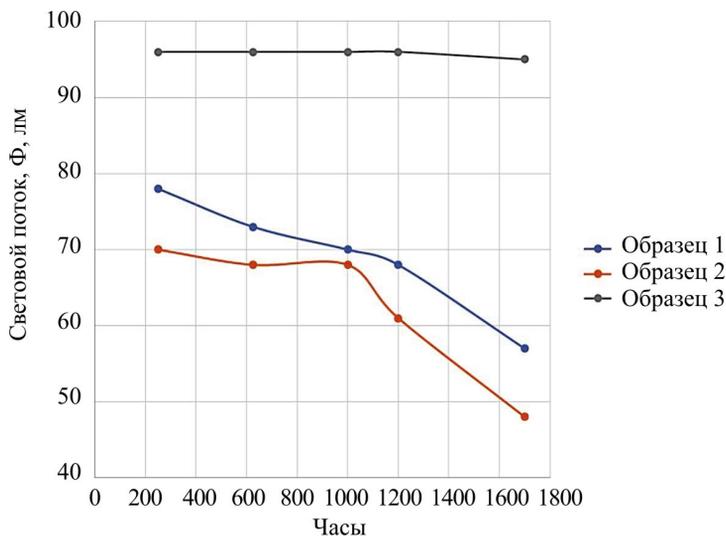


Рис. 1. Зависимость потока от времени протекания тока

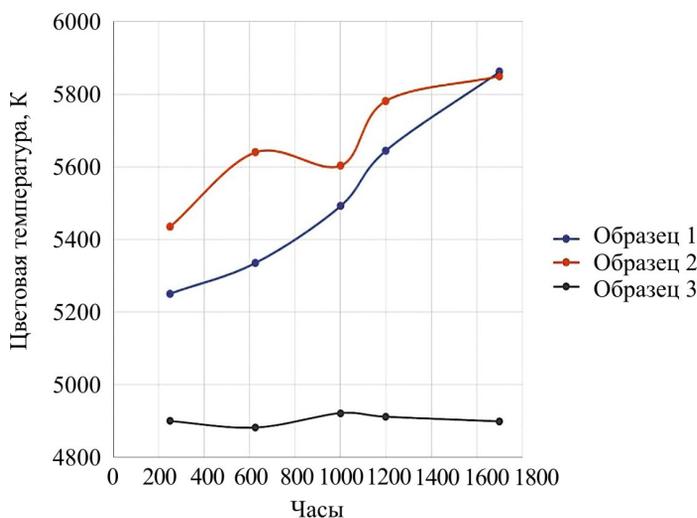


Рис. 2. Зависимость цветовой температуры от времени деградации

Цветовая температура

Начальное значение цветовой температуры всех трех исследуемых образцов составляло примерно 4900 К (см. табл. 2), что соответствует естественному диапазону белого цвета. Из представленных в табл. 2 и на рис. 2 результатов видно, что значения цветовой температуры в течение 1700 ч непрерывной работы увеличились для исследуемых образцов № 1 и № 2 до 5850 К и 5862 К соответственно. Получается,

что изменение цветовой температуры исследуемых образцов № 1 и № 2 составило 950 К и 962 К соответственно. Цветовая температура контрольного образца № 3 с учетом погрешности, составляющей не более 5 %, оставалась неизменной и равной начальному значению всех образцов. Относительный сдвиг цветовой температуры исследуемых образцов № 1 и № 2 составил порядка 19 и 20 % соответственно.

Вольт-амперные характеристики

ВАХ образца № 1 представлены на рис. 3. Видно, что значение прямого напряжения образца после 1700 ч работы (черные точки) возросло по сравнению с напряжением образца в начальный момент времени (красные точки). Рост напряжения составил порядка 0,15 В, что можно считать незначительным изменением.

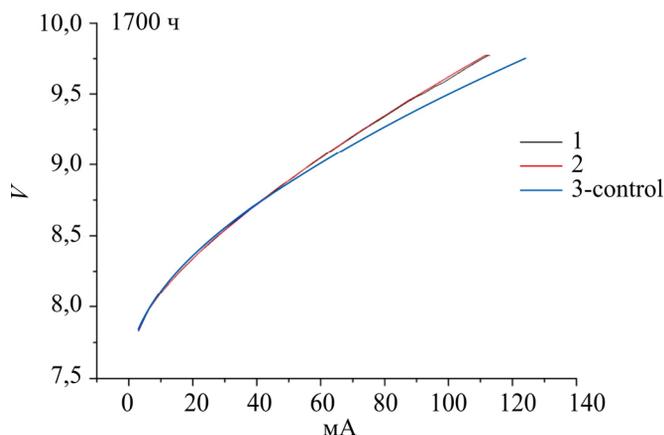


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики при 0 ч и 1700 ч непрерывной работы

Спектральные характеристики

На рис. 4 представлены спектральные характеристики трех исследованных образцов. Спектры образцов № 1 (черная кривая) и № 2 (красная кривая) соответствуют 1700 ч работы, спектр образца № 3 (синяя кривая) соответствует начальному состоянию.

На графиках отчетливо видны два пика. Первый, узкий пик с максимумом около 450 нм соответствует спектру электролюминесценции синего кристалла на основе InGaN/GaN-гетероструктур; второй, широкий, с максимумом в диапазоне 560–570 нм соответствует полосе свечения YAG-люминофора. Интенсивность первого пика уменьшилась

у образцов № 1 и № 2 по сравнению с интенсивностью аналогичного пика образца № 3 примерно на 15 %. Интенсивность второго пика также уменьшилась, снижение ее составило для образца № 1 $\approx 40\%$, а для образца № 2 – $\approx 50\%$.

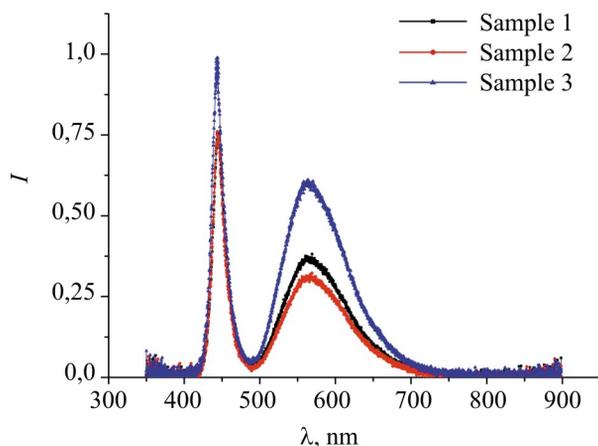


Рис. 4. Спектральные характеристики трех образцов светодиодов после 1700 ч старения

Можно отметить, что уменьшение интенсивности второго пика является вполне существенным, тогда как изменение первого пика примерно соответствует ранее полученным результатам [1, 2].

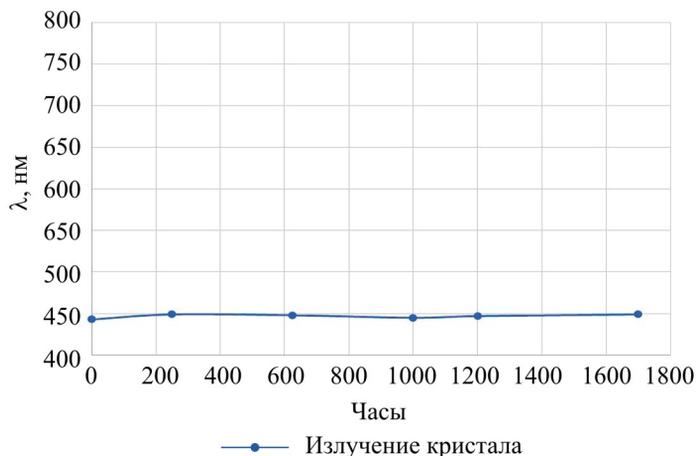
Положение максимума первого пика (излучение кристалла) практически не сместилось за время эксперимента (рис. 5, а). Второй пик (излучение люминофора) сместился в коротковолновую область примерно на 25 нм (рис. 5, б).

3. Обсуждение результатов

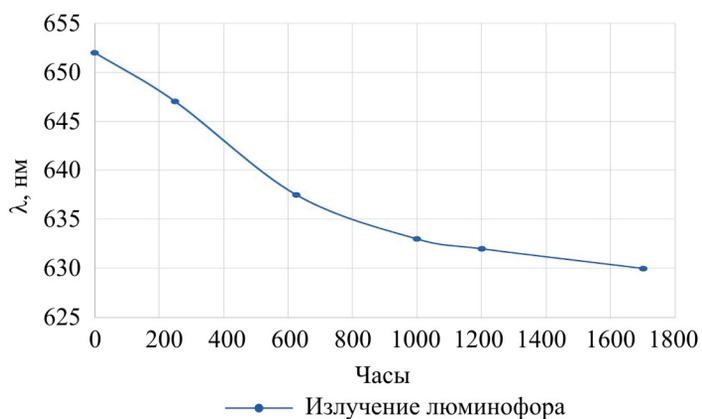
Для оценки снижения светового потока исследуемых СД был использован экспоненциальный закон:

$$\Phi(t) = \Phi_{\max} e^{-\alpha(t-t_{\max})}, \quad (1)$$

где Φ_{\max} соответствует максимальному значению светового потока, который наблюдается в момент времени t_{\max} . В нашем случае поток Φ_{\max} соответствует световому потоку в начальный момент времени, следовательно, t_{\max} можем принять равным нулю.



а



б

Рис. 5. Изменение длины волны максимума спектральной полосы излучения кристалла (а) и люминофора (б) в зависимости от времени работы

На основе формулы (1) был рассчитан показатель α , отвечающий за снижение светового потока с течением времени; полученное значение составило $3,01 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$. С использованием полученного показателя снижения светового потока построена теоретическая кривая зависимости потока от времени (рис. 6), на которую были нанесены экспериментальные точки. Как видно из рис. 6, полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретической кривой.

Рост напряжения на ВАХ (см. рис. 3) можно объяснить ростом внутреннего сопротивления структуры, вызванного увеличением числа дефектов кристалла [1–4]. Учитывая, что величина изменения напря-

жения незначительная, можно сделать вывод, что увеличение числа дефектов не столь существенно, что можно объяснить улучшением качества современных структур по сравнению с ранее исследованными [1, 2], а потому не является основным фактором ухудшения характеристик СД в процессе старения.

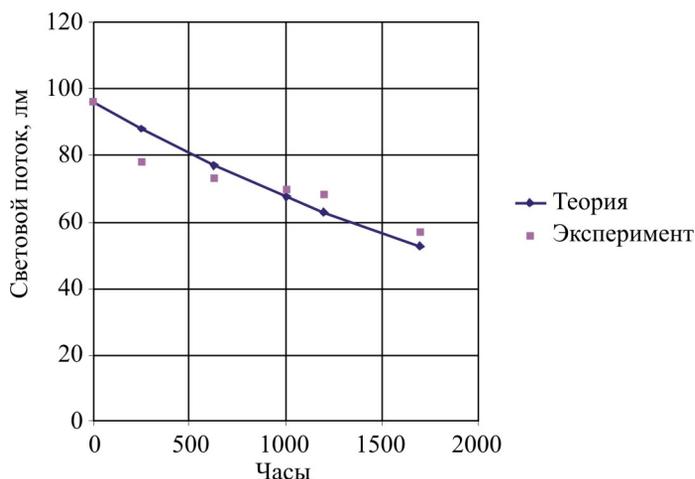


Рис. 6. Зависимость светового потока от времени

Уменьшение интенсивности синего пика в спектрах светодиодов после 1700 ч непрерывной работы, как уже отмечалось выше, составило $\approx 15\%$. Этот результат не превышает аналогичные значения, наблюдавшиеся ранее на первых синих светодиодах [1, 2]. Данное уменьшение интенсивности может быть объяснено механизмами старения гетероструктур, описанными ранее [1–4]. Смещение длины волны излучения синего кристалла после 1700 ч работы при повышенном токе и температуре практически не наблюдалось, что также соответствует ранее наблюдавшимся результатам [1, 2].

Интенсивность пика, соответствующего излучению люминофора, уменьшение которого составило $\approx 40\text{--}50\%$, можно считать достаточно существенным. Это свидетельствует о том, что за 1700 ч непрерывной работы наблюдается значительная деградация люминофора, что приводит к смещению цвета излучения светодиода в синюю область спектра.

Это согласуется с наблюдаемым изменением цветовых характеристик исследуемых образцов.

При изучении цветовых координат для трех образцов было выявлено значительное смещение цветовых координат по оси Y на локусе

(рис. 7). Для образца № 1 (синяя точка) изменение цветовой координаты Y составило 0,053, для образца № 2 (желтая точка) изменение данной координаты составило 0,054 (см. табл. 2).

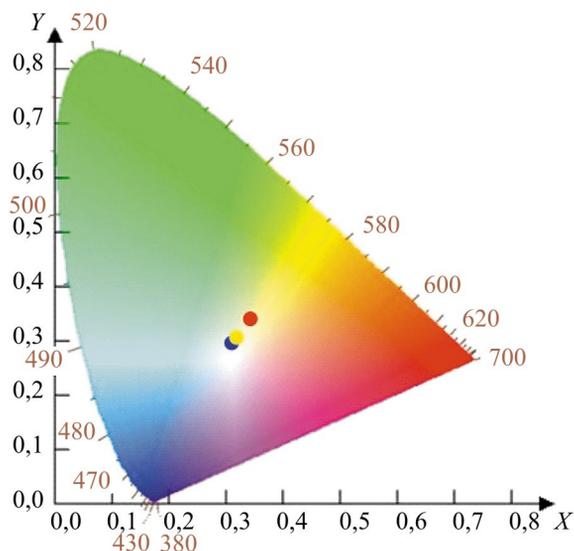


Рис. 7. Цветовые координаты исследуемых образцов

Из результатов, представленных на рис. 7, можно определить смещение цветовой координаты по оси Y , иными словами, цвет излучения светодиода «уходит» в синюю область. Это можно объяснить тем, что при постоянной работе светодиода при повышенной температуре люминофор подвергается высоким нагрузкам, что приводит к деградации центров свечения, в результате этого эффективность преобразования и спектральные характеристики люминофора ухудшаются. Как следствие, цветовая температура исследуемых образцов выросла с 4900 К, что соответствует области естественного белого цвета, до 5850 К, что соответствует холодному белому цвету. Величина смещения цветовой температуры составила примерно 950 К, что превосходит ширину допустимой области, в пределах которой разница не различается человеческим глазом (в данном диапазоне это значение составляет приблизительно 350–300 К).

В большинстве современных светотехнических устройств на основе светодиодов рабочая температура p - n перехода составляет 85 °С, поэтому была произведена оценка показателя снижения светового потока при данной температуре p - n перехода. При расчете предполага-

лось, что в первом приближении показатель экспоненты в законе деградации, описываемом формулой (1), линейно изменяется в зависимости от температуры. Вычисленный таким образом коэффициент α для температуры p - n перехода для $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ составил $2,08 \cdot 10^{-4}\text{ ч}^{-1}$. С использованием данного коэффициента был произведен расчет времени, за которое светодиод деградирует на 30 и 50 %.

Первый случай соответствует существующим требованиям к стабильности характеристик светодиодов в светотехнических устройствах, согласно которым за 50 000 ч работы при стандартных условиях световой поток СД должен снижаться не менее чем до 70 % от начального значения. Проведенная оценка показывает, что при стандартных условиях работы световой поток исследуемых светодиодов снизится до 70 % начального потока за 1658 ч, что приблизительно соответствует 8 мес.

Второй случай соответствует снижению светового потока, реально наблюдавшегося в эксперименте. Проведенная оценка показывает, что снижение светового потока образцов до 50 % от начального значения при температуре p - n перехода $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ произойдет за 2505 ч, что примерно соответствует 10,5 мес. У исследуемых светодиодов также наблюдается сдвиг цветовой температуры в процессе непрерывной работы. Данный сдвиг заметен человеческим глазом, что не очень хорошо для источников света.

Выводы

Из приведенных в статье результатов основными практически важными можно назвать существенное снижение светового потока белых светодиодов по сравнению с первоначальными значениями, что было вызвано в основном деградацией люминофора, а также снижением интенсивности свечения кристалла. Кроме того, стоит отметить рост цветовой температуры в результате 1700 ч старения светодиодов, что привело к изменению цвета его свечения, заметному человеческим глазом.

На основании приведенных результатов можно сделать вывод, что светотехнические изделия, в которых используются исследуемые светодиоды, не будут соответствовать требованиям современной промышленности. Однако стоит учесть, что данные светодиоды были первыми серийными образцами компании-производителя, что определенным образом может объяснить недостаточно высокое качество.

Список литературы

1. Взаимосвязь изменения распределения концентрации заряженных центров и характеристик светодиодных гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN при длительном протекании прямого тока / А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин, В.Е. Кудряшов, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович // Изв. вузов. Материалы электронной техники. – 1998. – № 3. – С. 60–65.

2. Изменения люминесцентных и электрических свойств светодиодов из InGaN/AlGaIn/GaN при длительной работе / А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин, В.Е. Кудряшов, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 2. – С. 224–232.

3. Некоторые закономерности деградации синих светодиодов на основе InGaIn/GaN / Е.Д. Васильева, А.Л. Закгейм, Ф.М. Снегов, А.Е. Черняков, Н.М. Шмидт, Е.Б. Якимов // Светотехника. – 2007. – № 5.

4. Полищук А.Г., Туркин А.Н. Деградация светодиодов на основе гетероструктур нитрида галлия и его твердых растворов // Светотехника. – 2008. – № 5. – С. 44–47.

5. Светодиоды «теплого» белого свечения на основе р-п-гетероструктур типа InGaIn/AlGaIn/GaN, покрытых люминофорами из итрий-гадолиниевых гранатов / Н.П. Социн, Н.А. Гальчина, Л.М. Коган, С.С. Широков, А.Э. Юнович // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, вып. 5. – С. 700–704.

6. Спектры люминесценции, эффективность и цветовые характеристики светодиодов белого свечения на основе р-п- гетероструктур InGaIn/GaN, покрытых люминофорами / М.Л. Бадгутдинов, Е.В. Коробов, Ф.А. Лукьянов, А.Э. Юнович, Л.М. Коган, Н.А. Гальчина, И.Т. Рассохин, Н.П. Социн // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, вып. 6. – С. 758–763.

7. Мощные светодиоды белого свечения для освещения / М.Л. Бадгутдинов, Н.А. Гальчина, Л.М. Коган, И.Т. Рассохин, Н.П. Социн, А.Э. Юнович // Светотехника. – 2006. – № 3. – С. 36–40.

8. Спектры излучения мощных светодиодов белого свечения и осветители на их основе / М.Г. Варешкин, Н.А. Гальчина, Л.М. Коган, И.Т. Рассохин, Н.П. Социн, А.Э. Юнович // Светотехника. – 2005. – № 1. – С. 15–18.

9. Иванов А.В., Фёдоров А.В., Семёнов С.М. Энергосберегающие светильники на основе высокоярких светодиодов // Энергообеспечение

и энергосбережение – региональный аспект: XII Всерос. совещание: материалы докл. – Томск; СПб.: Графикс, 2011. – С. 74–77.

10. Туркин А. Полупроводниковые светодиоды: история, факты, перспективы // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 5. – С. 28–33.

References

1. Kovalev A.N., Maniakhin F.I., Kudriashov V.E., Turkin A.N., Iunovich A.E. Vzaimosv'яз' izmeneniia raspredeleniia kontsentratsii zaryazhennykh tse ntrov i kharakteristik svetodiodnykh geterostruktur InGaN/AlGaN/GaN pri dlitel'nom protekanii priamogo toka [The relationship of changes in the concentration of charged centers and characteristics of led heterostructures InGaN/AlGaN/GaN with long-term flow of direct current]. *Izvestiia vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki*, 1998, no. 3, pp. 60-65.

2. Kovalev A.N., Maniakhin F.I., Kudriashov V.E., Turkin A.N., Iunovich A.E. Izmeneniia liuminescentnykh i elektricheskikh svoistv svetodiodov iz InGaN/AlGaN/GaN pri dlitel'noi rabote [Changes luminescent and electrical properties of the LEDs of InGaN/AlGaN/GaN after prolonged use]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1999, vol. 33, no. 2, pp. 224-232.

3. Vasil'eva E.D., Zakgeim A.L., Snegov F.M., Cherniakov A.E., Shmidt N.M., Iakimov E.B. Nekotorye zakonomernosti degradatsii sinikh svetodiodov na osnove InGaN/GaN [Some patterns of degradation blue LEDs based on InGaN/GaN]. *Svetotekhnika*, 2007, no. 5.

4. Polishchuk A.G., Turkin A.N. Degradatsiia svetodiodov na osnove geterostruktur nitrida galliia i ego tverdykh rastvorov [Degradation of LEDs based on heterostructures of gallium nitride and its solid solutions]. *Svetotekhnika*, 2008, no. 5, pp. 44-47.

5. Soshchin N.P., Gal'china N.A., Kogan L.M., Shirokov S.S., Iunovich A.E. Svetodiody "teplogo" belogo svecheniia na osnove p-n-geterostruktur tipa InGaN/AlGaN/GaN, pokrytykh liuminoforami iz ittrii-gadolinievnykh granatov [LEDs warm white light based on the p-n heterostructures type InGaN/AlGaN/GaN coated phosphors of the yttrium-gadolinium garnet]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2009, vol. 43, iss. 5, pp. 700-704.

6. Badgutdinov M.L., Korobov E.V., Luk'ianov F.A., Iunovich A.E., Kogan L.M., Gal'china N.A., Rassokhin I.T., Soshchin N.P. Spektry liuminesentsii, effektivnost' i tsvetovye kharakteristiki svetodiodov belogo svecheniia na osnove p-n-geterostruktur InGaN/GaN, pokrytykh liuminoforami [LEDs warm white light based on the p-n heterostructures type In-

GaN/AlGaIn/GaN luminescence Spectra, the efficiency and the color characteristics of the white light emitting diodes based on p-n - InGaIn/GaN heterostructures, covered with phosphors]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2006, vol. 40, iss. 6, pp. 758-763.

7. Badgutdinov M.L., Gal'china N.A., Kogan L.M., Rassokhin I.T., Soshchin N.P., Iunovich A.E. Moshchnye svetodiody belogo svecheniia dlia osveshcheniia [Powerful white light emitting diodes for lighting]. *Svetotekhnika*, 2006, no. 3, pp. 36-40.

8. Vareshkin M.G., Gal'china N.A., Kogan L.M., Rassokhin I.T., Soshchin N.P., Iunovich A.E. Spektry izlucheniia moshchnykh svetodiodov belogo svecheniia i osvetiteli na ikh osnove [Emission spectra of a powerful white light emitting diodes and lighting based on them]. *Svetotekhnika*, 2005, no. 1, pp. 15-18.

9. Ivanov A.V., Fedorov A.V., Semenov S.M. Energoberegaiushchie svetil'niki na osnove vysokoiarkikh svetodiodov [Energy-saving lamps on the basis of high-brightness LEDs]. *XII Vserossiiskoe soveshchanie: materialy dokladov "Energoobespechenie i energoberezhenie – regional'nyi aspekt"*. Tomsk: Saint-Petersburg: Grafiks, 2011, pp. 74-77.

10. Turkin A. Poluprovodnikovye svetodiody: istoriia, fakty, perspektivy [Semiconductor LEDs: history, facts, perspectives]. *Poluprovodnikovaia svetotekhnika*, 2011, no. 5, pp. 28-33.

Получено 5.03.2015