

- Александр Юрьевич Белов** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, Москва
- Владислав Евгеньевич Бугров** — д-р физ.-мат. наук; ЗАО „Оптоган“, Санкт-Петербург; исполнительный вице-президент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; заведующий кафедрой
- Алексей Русланович Ковш** — д-р физ.-мат. наук; ЗАО „Оптоган“, Санкт-Петербург; исполнительный вице-президент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; профессор
- Максим Анатольевич Одноблюдов** — канд. физ.-мат. наук; ЗАО „Оптоган“, Санкт-Петербург; генеральный директор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; профессор
- Алексей Евгеньевич Романов** — д-р физ.-мат. наук; ООО „Оптоган. Новые технологии света“, Санкт-Петербург; гл. науч. сотрудник; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; профессор; Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург; вед. науч. сотрудник

Рекомендована кафедрой  
светодиодных технологий НИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
07.02.13 г.

УДК 628.9.03

К. А. Виноградова, В. Е. Бугров, А. Р. Ковш, М. А. Одноблюдов,  
В. И. Николаев, А. Е. Романов

## ДЕГРАДАЦИЯ БЕЛЫХ И СИНИХ СВЕТОДИОДОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВРЕМЕНИ РАБОТЫ

Исследованы временные зависимости прямого падения напряжения на светодиодах, излучающих синий и белый свет, работающих длительное время, до 21 тыс. ч, на постоянном токе 20, 25 и 30 мА. Показано, что в белых светодиодах на основе силикатного люминофора с коррелированной цветовой температурой 4500 К наблюдается ускоренная деградация по сравнению со светодиодами синего света.

**Ключевые слова:** синий светодиод, белый светодиод, люминофор, деградация.

Понимание механизма деградации светодиодов является крайне важным для разработки новых высокоэффективных экономичных источников света. Обеспечение надежности светодиода — комплексная задача, которая включает в себя обеспечение требуемых характеристик всех элементов прибора: полупроводникового чипа, инкапсулянта, люминофора, электрических соединений. В условиях реальной эксплуатации светодиодов особенно важно обеспечить длительный срок службы всех его элементов с учетом протекающих в них физико-химических процессов, вызывающих постепенную деградацию характеристик, в частности, снижение светового потока и эффективности, а также изменение электрических параметров [1—6].

В настоящей статье представлены результаты исследований по оценке влияния концентрации люминофора в белом светодиоде на изменение электрических характеристик синего светоизлучающего чипа при длительной работе.

**Объект исследований.** Были исследованы семь групп светодиодов, выпущенных компанией „Оптоган“ (Санкт-Петербург), на основе чипов типоразмера  $10 \times 23 \text{ mil}^2$  ( $1 \text{ mil} = 25,4 \text{ мкм}$ ) синего света с пиковой длиной волны  $\lambda = 449 \text{ нм}$ . Процесс изготовления чипов описан в работе [7]. Светодиоды групп 1, 2 выполнены на основе чипов, гетероструктуры которых были выращены в ходе одного технологического процесса, и отличаются друг от друга наличием люминофора: светодиоды группы 1 не содержат люминофор. Белые светодиоды группы 2 характеризуются коррелированной цветовой температурой  $\text{CCT} = 4500 \text{ К}$  ( $\text{CCT} — \text{Correlated Color Temperature}$ ). Светодиоды групп 3—7, созданные на основе чипов, гетероструктуры которых выращивались в ходе различных технологических процессов, отличаются друг от друга концентрацией люминофора. Значения  $\text{CCT}$  для исследованных групп, измеренные в начальный момент включения устройства, и результаты изменения напряжения  $\Delta U$  от начального значения по истечении 21 тыс. ч работы при различных значениях тока  $I$  приведены в таблице.

Номер группы	CCT, К	$\Delta U$ , %, при $I$ , мА		
		20	25	30
1	—	7	6	9
2	4500	9	9	9
3	3850	1	0	1
4	4500	–4	–1	1
5	4500	–1	–1	0
6	4650	4	6	7
7	4700	0	0	1

**Методика эксперимента.** Каждая группа состояла из 15 образцов светодиодов, созданных в ходе следующих процессов: постановка чипа в стандартный корпус PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier) размером  $35 \times 28 \text{ мм}$ , создание электрических межсоединений, инкапсуляция чипа и выводов. Каждые из пяти светодиодов были установлены на печатные платы, припаяны и подключены к источнику постоянного тока соответственно 20, 25 и 30 мА. Измерения характеристик проводились через каждые 168 ч в течение первых 3 тыс. ч работы, затем — через каждые 672 ч (один раз в месяц) до достижения 5 тыс. ч, а по истечении 5 тыс. ч — один раз в два месяца. Напряжение измерялось при помощи тестера путем приложения щупов к электрическим контактам каждого светодиода.

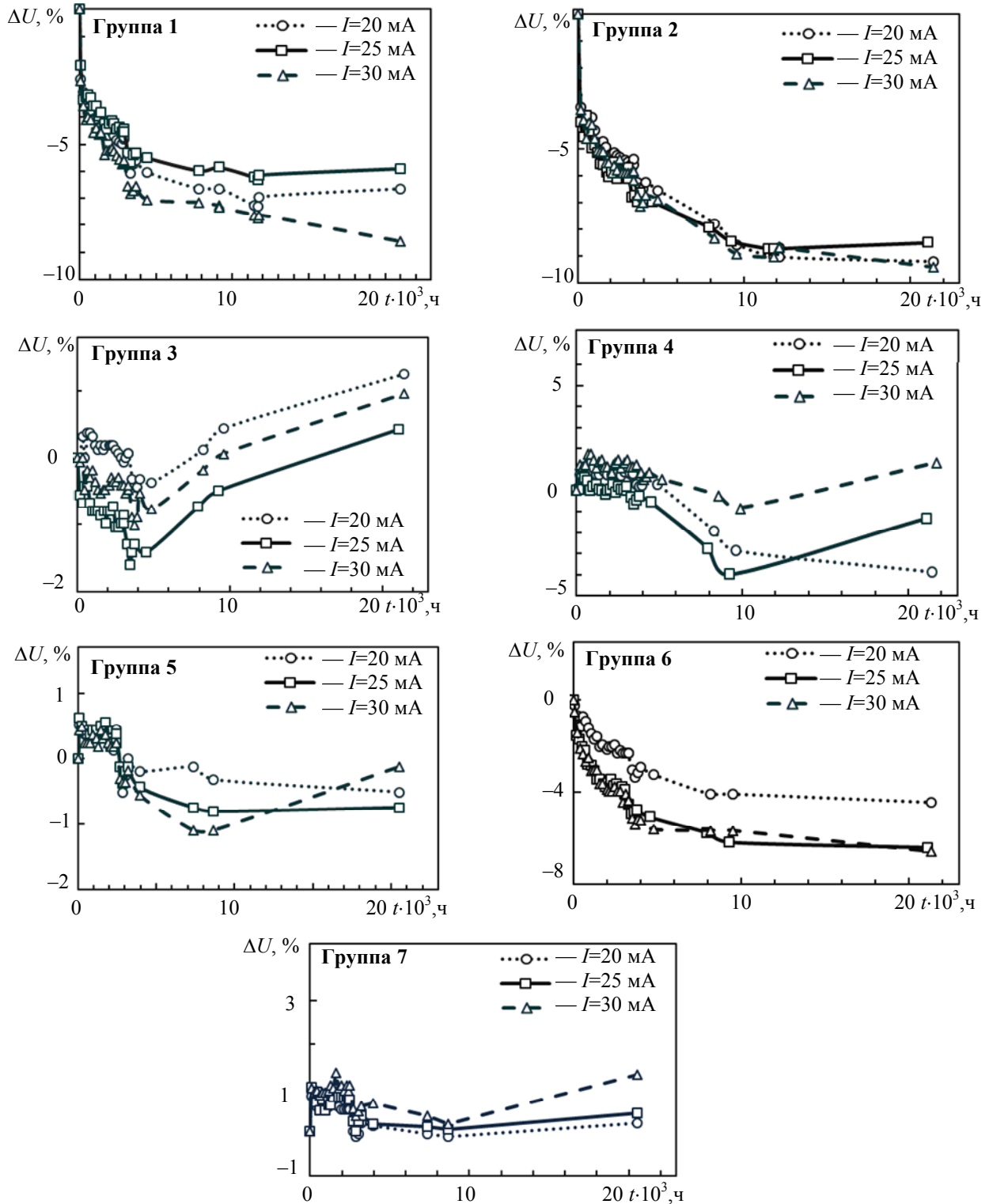
Для оценки изменения напряжения с течением времени работы светодиодов измеренные значения  $\Delta U$  усреднялись по пяти образцам, работающим на одинаковом токе. Изменение напряжения от начального значения вычислялось по формулам

$$\Delta U_1 = \frac{\sum_{i=1}^5 U_{i0} - \sum_{i=1}^5 U_{i1}}{\sum_{i=1}^5 U_{i0}} \cdot 100\%, \dots, \Delta U_N = \frac{\sum_{i=1}^5 U_{i0} - \sum_{i=1}^5 U_{iN}}{\sum_{i=1}^5 U_{i0}} \cdot 100\%,$$

где  $\Delta U_1, \Delta U_N$  — изменение напряжения от первоначального значения за время  $t$  работы светодиодов, равное 1 и  $N$  ч соответственно;  $U_{i0}$  — падение напряжения на  $i$ -м образце в момент первого подключения прибора;  $U_{i1}, U_{iN}$  — значения падения напряжения на  $i$ -м образце через временные интервалы  $t = 1$  ч и  $t = N$  ч соответственно.

Значение  $\Delta U < 0$  свидетельствует о том, что падение напряжения, измеренное в момент времени  $t$ , увеличилось по сравнению с начальным значением.

**Результаты и их обсуждение.** На рисунке представлены результаты обработки измерений: зависимости изменения падения напряжения  $\Delta U$  от времени работы светодиодов при различных значениях тока. Следует отметить разный характер кривых для исследованных групп светодиодов.



Рассмотрим графики для групп 1, 2. С увеличением времени работы значение  $\Delta U$  уменьшается. На начальном участке, соответствующем 1 тыс. ч работы устройства — времени, используемому на производстве для оценки годности светодиодов и проведения теста на деградацию электрических и оптических характеристик (так называемый Life Time Test [1]),

наблюдается увеличение напряжения на 4 % в группе 1 и на 5 % в группе 2 для трех значений  $I$ . Такое изменение напряжения может быть связано либо с качеством светодиодного чипа, либо с качеством сварных соединений контактных площадок чипа и корпуса, либо с качеством припаивания светодиодов к печатной плате. Однако две последние причины должны быть исключены вследствие применения одинаковых технологических режимов для всех семи рассмотренных групп и отсутствия столь явного изменения напряжения светодиодов групп 3—7.

В светодиодах групп 1 и 2 обнаружено, что за 21 тыс. ч работы значение  $\Delta U$  составило 7 и 9 % соответственно. Возможно, что наличие люминофора ведет к дополнительному нагреву чипа светодиода за счет стоксовых потерь и усугублению процесса деградации. В группах 3, 5 и 7 изменения практически отсутствуют и флуктуации связаны лишь с погрешностью прибора. Группа 6 имеет сходный с группами 1, 2 характер изменения характеристики. Изменение тока с 20 до 30 мА не оказывает существенного влияния на скорость деградации светодиодов всех рассмотренных групп.

Наиболее вероятно, что увеличение напряжения может быть обусловлено флуктуацией ширины запрещенной зоны, характерной для нитридов, высокоомностью  $p$ -слоя и паразитным падением напряжения в буферных слоях  $n$ -типа [2, 7], а также увеличением контактного сопротивления [3] и числа дефектов в полупроводниковом чипе [4]. Установить причину можно путем выявления отличий в технологических процессах при производстве светодиодных чипов и проведения дополнительных исследований. Как отмечено в работе [5], значения плотности тока, аналогичные примененным в описываемом исследовании, не оказывают сильного влияния на деградацию светодиодов. В работе [6] подтверждается факт „увеличенной“ деградации оптических свойств белых светодиодов, полученных с использованием нанесенного непосредственно на чип люминофора, вследствие более высокой температуры перехода по сравнению с белыми светодиодами, в которых люминофор расположен в отдалении от синего чипа.

**Заключение.** Проведенные исследования показали, что в белых светодиодах с ССТ = 4500 К в течение 21 тыс. ч работы на постоянном токе наблюдается небольшое, на 3 %, увеличение падения напряжения по сравнению с синим светодиодом, инкапсуляция которого проводилась без использования люминофора.

При тестировании светодиодов подтверждено, что временной интервал в 1 тыс. ч является достаточным для того, чтобы спрогнозировать изменение напряжения.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках контракта № 14.516.11.0085.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SSL Standards JESD22-A108D. Temperature Bias and Operating Life. 2010 [Электронный ресурс]: <<http://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd-22-a108c>>.
2. Шуберт Ф. Е. Светодиоды. М.: Физматлит, 2008.
3. Moon S.-M., Kwak J. S., High-current electro-optical degradation of InGaN/GaN light-emitting diodes fabricated with Ag-based reflectors // J. of Korean Phys. Society. 2009. Vol. 55, N 3. P. 1128—1131.
4. Jianzheng H. et al. Electrical, optical and thermal degradation of high power GaN/InGaN light emitting diodes // J. Phys.D: Applied Physics. 2008. Vol. 41, N 3.
5. Meneghini M. et al. Extensive analysis of the degradation of phosphor-converted LEDs // Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7422.
6. Narendran N. et al. Solid-state lighting: failure analysis of white LEDs // J. of Crystal Growth. 2004. Vol. 268. P. 449—456.
7. Törmä P.T. et al. Maskless roughening of sapphire substrates for enhanced light extraction of nitride based blue LEDs // Solid State Electronics. 2009. Vol. 53, Iss. 2. P. 166—169.

**Сведения об авторах**

- Ксения Анатольевна Виноградова** — магистр; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; ассистент; Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН; Санкт-Петербург; ст. лаборант; E-mail: kseniia.vinogradova@gmail.com
- Владислав Евгеньевич Бугров** — д-р физ.-мат. наук; ЗАО „Оптоган“, Санкт-Петербург; исполнительный вице-президент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; заведующий кафедрой
- Алексей Русланович Кови** — д-р физ.-мат. наук; ЗАО „Оптоган“, Санкт-Петербург; исполнительный вице-президент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; профессор
- Максим Анатольевич Одноблюдов** — канд. физ.-мат. наук; ЗАО „Оптоган“, Санкт-Петербург; генеральный директор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; профессор
- Владимир Иванович Николаев** — канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; доцент; Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН; Санкт-Петербург; науч. сотрудник
- Алексей Евгеньевич Романов** — д-р физ.-мат. наук; ООО „Оптоган. Новые технологии света“, Санкт-Петербург; гл. науч. сотрудник; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; профессор; Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург; вед. науч. сотрудник

Рекомендована кафедрой  
светодиодных технологий НИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
07.02.13 г.