

О деградации и отказах белых светодиодов

М.В. РЫЖКОВ¹

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ООО «ПРОСОФТ ТРЕЙДИНГ», Москва

Аннотация

Краткий аналитический обзор современной литературы по вопросам деградации и отказов высокоярких белых светодиодов.

Ключевые слова: светодиод, отказы, деградация, кристалл, люминофор, полимерные материалы, силикон.

1. Деградация характеристик и отказы светодиодных кристаллов

1.1. Деградация характеристик кристаллов

Весьма обширная тема деградации светотехнических, электрических и тепловых характеристик светодиодных кристаллов достаточно хорошо освещена целым рядом работ (см., напр., [1–4]), и здесь не рассматривается.

1.2. Основные причины отказа кристаллов

Тепловые напряжения. Внезапные отказы чаще всего вызываются тепловыми напряжениями. Когда

эпоксидная смола или полимерный гель достигают температуры перехода в состояние стеклования, они начинают быстро расширяться, вызывая механические усилия на полупроводнике и контактных площадках, ослабляя контакт или даже вызывая разрыв. И наоборот, очень низкие температуры могут вызывать нарушение светодиодной упаковки.

Электростатический разряд (ESD) или электрическое перенапряжение могут вызывать непосредственный отказ соединения полупроводника, постоянное изменение его параметров, либо скрытые повреждения, которые могут приводить к ускорению деградации. Светодиоды (СД) и лазеры, выращенные на сапфировой подложке, более восприимчивы к ESD. При этом прямое смещение электростатического разряда может пройти через светодиод без каких-либо повреждений структуры, но обратное смещение ESD может вызывать разрушение структуры или разрыв выводов (см., напр., рис. 1).

Решение проблемы влияния электростатического разряда и электрического перенапряжения лежит на поверхности. Правильно подобранный полупроводниковый стабилитрон (диод Зеннера), поставленный в электрической схеме параллельно светодиоду, позволит выбросам напряжения проходить мимо как в прямом, так и в обратном направлениях без

повреждения светодиодной структуры. В дополнение неплохо бы в электрическую схему ставить и конденсатор, чтобы сглаживать входной сигнал и предотвращать отказы по причине электрического перенапряжения.

Короткое замыкание. Механические усилия, высокие токи, и коррозионная окружающая среда могут вести к формированию электропроводных частиц, вызывая короткие замыкания. Эти причины отказа светодиодного кристалла довольно распространены. Из множества потенциальных первопричин короткого замыкания наиболее весомы дислокации (а также так называемые микроканалы или наноканалы) и недостаточное или плохое пассивирование.

Обратное напряжение. Хотя СД основан на диодном соединении и номинально является выпрямителем, обратное пробивное напряжение смещения для некоторых типов СД может быть очень низким, и, соответственно, даже небольшое обратное напряжение на СД может вызывать ускоренные деградацию и отказ. 5 В – типичное «максимальное обратное напряжение смещения» для обычных СД, у некоторых же специальных типов СД значения могут быть ниже.

В целом, светодиодные кристаллы – простые электронные устройства. Отказы могут обычно исправляться с небольшими модификациями дизайна. В некоторых случаях дополнительные компоненты, ограждающие кристалл от вредных воздействий, в электрической схеме крайне необходимы, но в основном может решать проблему правильный выбор кристалла (компания-поставщика).

¹ E-mail: mikhail.ryzhkov@gmail.com



Рис. 1. Оплавление концов оборванной проволоки вследствие ESD или электрического перенапряжения

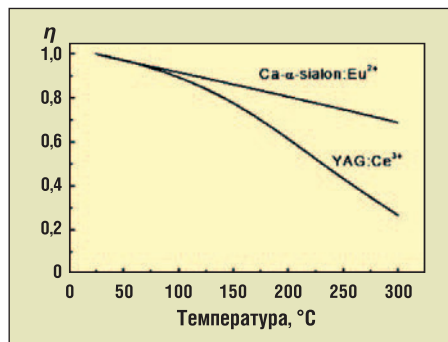


Рис. 2. Относительная температурная зависимость нормированной квантовой эффективности (η) двух типов люминофоров [9]

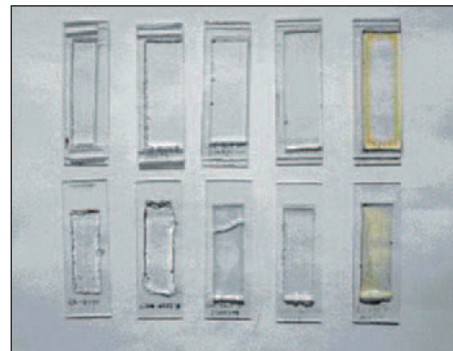
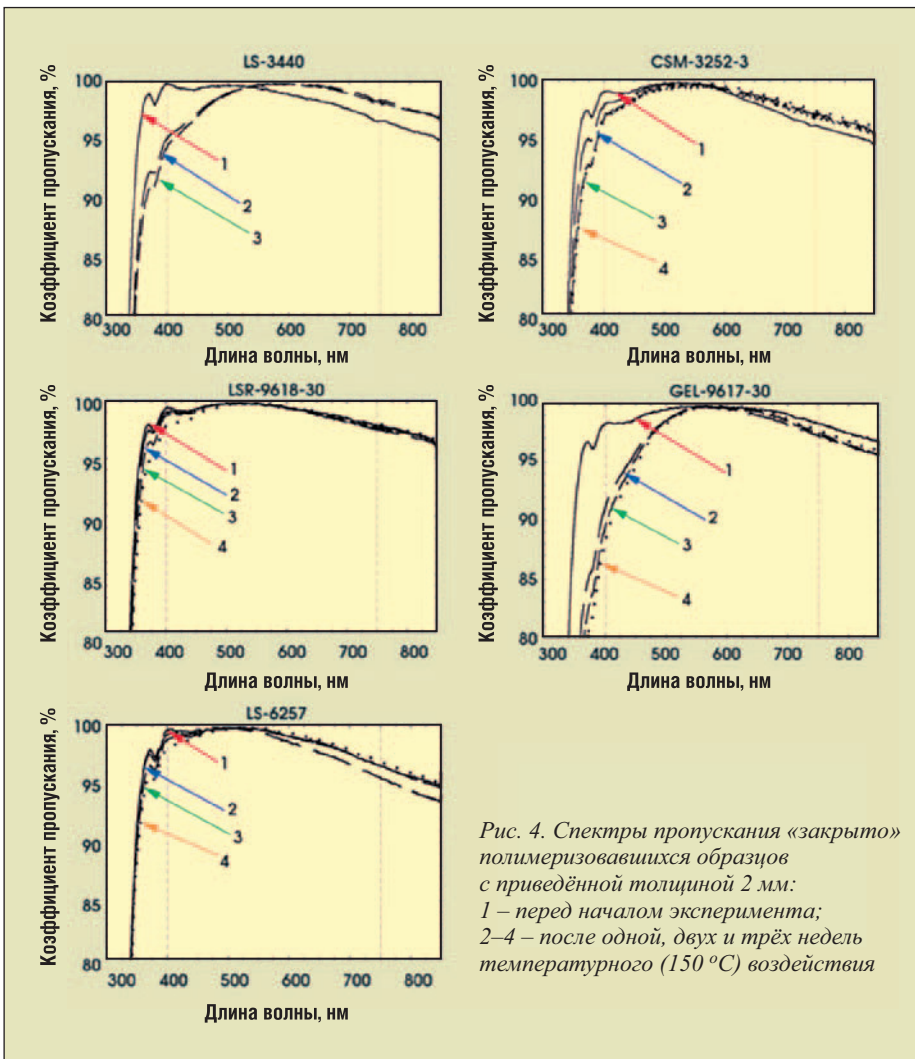


Рис. 3. Пять испытанных образцов полимерных материалов. По два образца каждого материала: верхний ряд – полностью закрытые стеклом («закрыто» полимеризовавшиеся), нижний ряд – полимеризовавшиеся на воздухе («открыто» полимеризовавшиеся)

Свойства испытывавшихся марок силикона

Марка	Коэффициент преломления (на длине волны 589 нм)	Твёрдость	Вязкость, Па·с
LS-3440	1,40	10 мм (проникновение)	55
CSM-3252-3	1,52	15 (тип 00)	50
LSR-9618-30	1,57	30 (тип D)	500
GEL-9617-30	1,54	15 (тип 00)	500
LS-6257	1,57	30 (тип A)	20



2. Дegradация светодиодных люминофоров

Большинство люминофоров постепенно теряют эффективность, и механизмы этого могут быть различны: может изменяться валентность активаторов (обычно окислением), может деградировать кристаллическая решётка, атомы – чаще активационные – диффундируют через материал, хими-

чески реагирует с окружающей средой поверхность и др.

Например:

- В люминофорах типа $BaMgAl_{10}O_{17}: Eu^{2+}$ (BAM) подвергаются окислению примеси при работе. В процесс вовлечены три механизма, приводящие к формированию $Eu(III)$ с соответствующей потерей эффективности: поглощение кислородных атомов из-за кислородных вакансий

на кристаллической поверхности, распространение $Eu(II)$ вдоль проводящего слоя и электронная передачи от $Eu(II)$ к адсорбированным кислородным атомам [5]. (Тонкое покрытие из фосфатов лантана (III) или алюминия эффективно для создания запирающего слоя, блокирующего доступ кислорода к люминофору типа BAM, но результатом этого всё-таки будет снижение эффективности люминесценции.) Допирование водородом, действуя как сдерживающий фактор, значительно расширяет время жизни люминофора BAM: Eu^{2+} , уменьшая количество атомов $Eu(III)$, увеличивает количество атомов $Eu(II)$ [6].

- Люминофоры на основе $Y_2O_3:Eu$ под электронной бомбардировкой в присутствии кислорода формируют нефосфоресцирующий слой на поверхности, где электронно-дырочные пары рекомбинируют неизлучательно через поверхностные состояния [7].

- Люминофоры на основе $ZnS:Mn$ деградируют в основном путём формирования глубоких электронных ловушек из-за реакции молекул воды с примесью (ловушки действуют как центры неизлучающей рекомбинации). Ловушки также повреждают кристаллическую решётку, что приводит к деградации люминесценции [8].

- Люминофоры на основе ZnS деградируют из-за поверхностного возбуждения, наращивания электрического заряда и теплового давления. Реакции непосредственно на поверхности, стимулируемые электронами, сильно коррелируют с потерей яркости. Так, реактивный водород удаляет серу с поверхности (через образование водородного сульфида), формируя неизлучающий слой металлического цинка. Сера может также удаляться как окись серы.

Другой важный механизм, приводящий к потере квантовой эффективности, – перегрев (рис. 2).

3. Дegradация полимерных компонентов светодиодов

Известно, что высокие температуры отрицательно влияют на функциональные характеристики светодиодных кристаллов, но недавние заявления ведущих компаний, таких как Philips Lumileds, показывают, что разработаны СД, функционирующие при температурах р – n-перехода до 185 °С без ущерба для светового потока. Пе-

переход от низко- и среднемоощных светодиодных кристаллов к кристаллам, используемым в сверхъярких СД, поставил вопрос о соответствующей упаковке СД, и, естественно, возникла необходимость в поиске более высокотемпературных герметизирующих оптических материалов. Оказалось, что почти идеальный выбор для этой цели – силикон. У оптически прозрачных силиконовых материалов целый ряд преимуществ: высокая прозрачность в видимом диапазоне спектра, широкий диапазон коэффициента преломления (от 1,38 до 1,57), изменяемый уровень твердости и крайне низкий коэффициент расширения при полимеризации. Однако некоторые, не до конца ещё изученные, недостатки есть и у них.

В связи с этим, в статье [10] освещено сравнительное исследование образцов пяти весьма характерных оптически прозрачных силиконов, несколько различающихся по коэффициенту преломления и составу (см. таблицу), на предмет оценки темпов деградации их оптического пропускания в течение 500 ч (около трёх недель) при нагреве до 150 °С. Образцы находились или между плотно сжатыми стеклянными пластинами, или были полностью открыты для атмосферного воздействия, одновременно все подвергаясь высокотемпературному воздействию. Визуальные наблюдения за образцами показали, что некоторые из них пожелтели равномерно, а некоторые нет (рис. 3).

При этом у одного материала, LS-6257 (самая правая вертикальная пара), видно пожелтение: в случае «закрытой» полимеризации видно жёлтое кольцо, а в случае «открытой» – равномерная желтизна. Кроме того, хотя на глаз это и не очень видно, «открытый» образец силикона CSM-3252-3 (второй слева в нижнем ряду) потемнён, о чём явно свидетельствуют данные спектроскопии (рис. 4 и 5); причём временной сдвиг спектров пропускания вправо говорит о пожелтении материала.

Как видно из рис. 4 и 5, наибольшая скорость деградации имеет место в течение первой недели температурного воздействия. Предположительно, за пожелтение в основном ответственны примеси².

² Бесприемный же силикон (в этом эксперименте не участвовавший) после

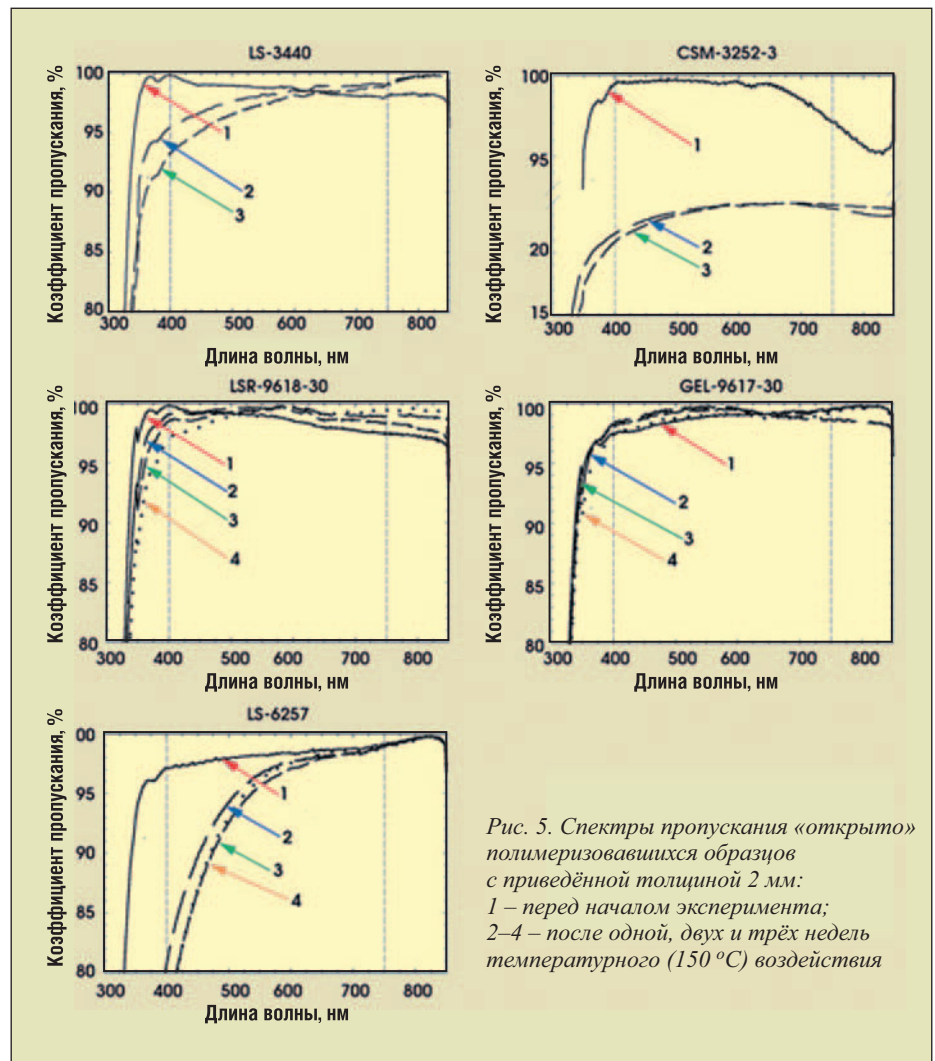


Рис. 5. Спектры пропускания «открыто» полимеризовавшихся образцов с приведённой толщиной 2 мм: 1 – перед началом эксперимента; 2–4 – после одной, двух и трёх недель температурного (150 °С) воздействия

4. Заключение

Итак, безусловно, каждый из компонентов СД может деградировать или давать отказ, и причины этого могут быть разные – от низкого качества используемого материала

указанного воздействия не желтеет, показывая стабильное пропускание. Заявления о почернении силиконового геля, иногда идущие от «упаковщиков» СД, могут быть объяснимы взаимодействием силикона с другими материалами, это никак не проблема самого силикона. Возможны следующие рекомендации по работе с силиконовыми соединениями при высоких температурах в производстве СД:

1. Проводить проверку совместимости геля со всеми материалами, с которыми он будет соприкасаться.
2. Выбирать силикон с минимумом добавок и включать как можно меньше собственных добавок.
3. Использовать силикон с хорошим оптическим пропусканием.

ла до исходно неверной конструкции СД. При этом, поскольку СД – прежде всего диод, основные факторы его повреждения, деградации или отказа связаны с неверными электрическим и (или) термическим режимами его эксплуатации.

Иными словами, даже идеально «упакованный» кристалл может повреждаться, например, завышенным током при эксплуатации и электростатическим разрядом при монтаже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meneghini, M., Podda, S., Morelli, A. et al. High brightness GaN LEDs degradation during dc and pulsed stress // Proc. 17 Europ. Symp. Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis, 3–6.10.2006, Wuppertal, Germany. – Vol. 46, Issues 9–11. – P. 1720–1724.
2. Васильева Е.Д., Закгейм А.Л., Снегов Ф.М. и др. Некоторые закономерности деградации синих светодиодов на основе InGaN/GaN // Светотехника. – 2007. – № 5. – С. 30–32.
3. Полищук А.Г., Туркин А.Н. Деградация светодиодов на основе гетероструктур нитри-

да галлия и его твёрдых растворов// Светотехника. – 2008. – № 5. – С. 44–47.

4. Lu Wang, Shiwei Feng, Gunsheng Guo, Guangchen Zhang Analysis of degradation of GaN-Based light-emitting diodes// 16 th IEEE Int. Symp. on the Phys. and Failure Anal. of Int. Circ., 6–10.07.2009. – P. 472–475.

5. Bizarri, G., Moine, B. On BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ phosphor degradation mechanism: Thermal treatment effects// Journal of Luminescence. – 2005. – Vol. 113, Issue 3–4. – P. 199–213.

6. Tanno, Hiroaki Lifetime Improvement of BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ Phosphor by Hydrogen Plasma Treatment// Japanese Journal of Applied Physics. – 2009. – Vol. 48.

7. Ntwaeaborwa, O. M. Degradation of Y₂O₃: Eu phosphor powders// Phys. Status Solidi C. – 2004. – Vol. 1.

8. Wang, Ching-Wu Deep Traps and Mechanism of Brightness Degradation in Mn-doped ZnS Thin-Film Electroluminescent Devices Grown by Metal-Organic Chemical Vapor Deposition// Japanese Journal of Applied Physics. – 1997. – Vol. 36.

9. Xie, Rong-Jun and Hirotsuki, Naoto Silicon-based oxynitride and nitride phosphors for white LEDs – A review// Sci. Technol. Adv. Mater. – 2007. – Vol. 8, № 7–8. – P. 588–600.

10. Elgin, R., Riegler, B., Thomajer, R. How Temperature Affects Silicone Encapsulants in High-Brightness LED Applications. URL: <http://www.photonics.com/Content/ReadArticle.aspx?ArticleID=29097> (дата обращения: 28.01.2010).



Рыжков Михаил Владимирович, кандидат физ.-мат. наук. В 2004 г. окончил физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Научный сотрудник Института радиотехники

и электроники им. В.А. Котельникова РАН и ведущий менеджер по производству отдела светотехники (XLight) ООО «ПРОСОФТ»

Поздравляем
с юбилеем!

Юрию Васильевичу Трофимову – 60 лет

14 мая с.г. директору Республиканского научно-производственного унитарного предприятия «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси», кандидату технических наук Юрию Васильевичу Трофимову исполнилось 60 лет.

Научно-практическая и организационная деятельность Ю.В. Трофимова неотрывно связана с оптоэлектроникой и светодиодной техникой – одними из наиболее перспективных и востребованных направлений развития современной науки и техники.

Будучи автором свыше двухсот научных работ, десятков авторских свидетельств и патентов, юбиляр всегда ориентировал себя и своих коллег на доведение результатов научных исследований до их практического применения в виде готовых к использованию изделий.

Так, при его непосредственном участии, уже в 1977 г. в Институте электроники НАН Беларуси была начата разработка технологии формирования фотопроводниковых тонких плёнок А2 В6 для прецизионной измерительной техники. Интенсивные исследования в этой области позволили впервые создать и внедрить в производство оптоэлектронные преобразователи и модуляторы ОЭП-26, ОР-36, –46, –56 и др., которые нашли применение в ряде нановольтметров В2–38, –39 и др.

Примерно к этому же периоду времени относятся первые исследования в области светодиодных мнемонических индикаторов и дисплеев.

В 1992 г. начаты работы по разработке технологии изготовления светодиодных осветителей для жидкокристаллических индикаторов. В результате на предприятии был налажен выпуск высококачественных светодиодных осветителей практически любого размера.

Под руководством Ю.В. Трофимова совместно с рядом российских компаний, были начаты работы по созданию светодиодных осветительных устройств. Совместное сотрудничество дало свои результаты: в 2001 г. появляются первые в СНГ светодиодные RGB прожекторы с управлением по протоколу DMX512.

В 2003 г. впервые реализован проект 100% светодиодного освещения VIP салонов самолетов: разработан и создан полный комплект светодиодных осветительных устройств различного функционального назначения, включая основное освещение, общей мощностью 2 кВт.

В 2004 г. создан первый осветительный прибор на светодиодах для наружного освещения – 60 Вт осветитель пешеходной зоны, совмещенный с дорожным

знаком «пешеходный переход» с эффектом анимации.

В 2006–2007 гг. успешно реализован проект 100%-ного освещения светодиодами железнодорожных вагонов повышенной комфортности.

В 2009 г. разработан, изготовлен и введён в эксплуатацию биотехнологичный комплекс с управляемыми светодиодами облучателями для исследования продукционных процессов сельскохозяйственных культур. Внедрение светодиодного освещения в тепличные хозяйства позволит выращивать экологически чистую свежую зелень, цветы, томаты и другие растения, затрачивая при этом меньше электроэнергии по сравнению с широко применяемыми в настоящее время НЛВД.

Ю.В. Трофимов всегда отличался профессиональным чутьем и гибкостью при выборе того или иного направления исследований, информированностью о современных тенденциях и уровне развития микрооптоэлектроники. Аналитический склад ума, огромная работоспособность, неисчерпаемая энергия в сочетании с добросердечностью, тонким чувством юмора позволили создать сплоченный коллектив единомышленников и коллег, достичь значительных научных и практических результатов.

Редколлегия и редакция журнала, коллектив «Центра светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси», коллеги и друзья поздравляют Юрия Васильевича Трофимова с юбилеем и выражают искреннюю признательность и уважение замечательному человеку, учёному, руководителю и специалисту высокого класса!