

Деградация полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов

Александр ПОЛИЩУК
a.polishuk@prosoft.ru
Андрей ТУРКИН
turkin@prosoft.ru

В настоящей статье приводятся и обсуждаются результаты исследования изменения интенсивности электролюминесценции кристаллов на основе InGaN/GaN-гетероструктур с квантовыми ямами при постоянном токе и повышенных значениях окружающей температуры и плотности тока.

Введение

Новыми перспективными оптоэлектронными материалами с широким спектром практических применений в качестве активных сред в лазерных диодах и светодиодах в области коротких длин волн являются структуры на основе полупроводниковых нитридов (GaN, AlN и некоторые соединения типа AlGaIn и InGaIn). Одним из направлений является создание ярких источников света в коротковолновой (сине-зеленой) области видимого спектра и ближней ультрафиолетовой области спектра, а также создание источников белого цвета в виде полупроводникового кристалла, покрытого люминофором.

Примеры применения светодиодов на основе GaN-гетероструктур

В настоящее время развитие полупроводниковых оптоэлектронных устройств из гетероструктур на основе нитрида галлия идет очень высокими темпами, особенно это касается разработки полупроводниковых светодиодов на основе гетероструктур из GaN и его твердых растворов.

Темпы роста показателей этих приборов просто фантастические и опережают все оценки, сделанные в начале XXI века. В 2005 году был достигнут уровень световой отдачи 47 лм/Вт при средней цене 0,15 \$/лм, а уже через два года световая отдача достигла 110 лм/Вт при средней цене 0,03 \$/лм. Самые смелые оценки не предполагали подобных темпов

роста, и достижение таких значений не предсказывалось даже к 2010 году.

Сравнение характеристик различных источников света, включая светодиоды, приведено в таблице 1.

Из сравнения видно, что достигнутый уровень эффективности полупроводниковых источников света, а также широкий спектр оттенков белого цвета (цветовая температура от 2600 до 10 000 К) позволяет использовать их во всех традиционных областях применения, таких как светосигнальная аппаратура, внутреннее и внешнее освещение, архитектурная подсветка. А такие свойства светодиодов, как большой ресурс, высокая стабильность световых характеристик и низкое энергопотребление, делают их исключительно перспективными для решения актуальной проблемы энергосбережения.

Актуальность темы исследования деградации GaN-гетероструктур

Важной особенностью полупроводниковых источников света является то, что они, в отличие от традиционных ламп, через 50–100 тысяч часов не выходят из строя. Наблюдается лишь постепенное снижение их светового потока. Однако вопрос оценки снижения потока, то есть деградации полупроводниковых светодиодов, приобретает в таком случае особую актуальность.

Вообще, вопрос надежности приборов является важнейшим для оптоэлектроники. Одну из основных ролей в этом вопросе играет деградация излучающих структур и их предель-

ные характеристики. Кроме того, для указанных выше белых светодиодов важным вопросом является деградация люминофора и всей системы «кристалл-люминофор». Это и определяет выбор трех основных проблем и соответствующих им направлений исследований:

1. Необходимость определения предельных характеристик приборов.
2. Необходимость изучения деградации светодиодных структур.
3. Необходимость изучения деградации люминофора в белых светодиодах.

Определение предельных характеристик светодиодов на основе широкозонных полупроводников типа нитрида галлия и механизмов деградации полупроводниковых структур предполагает проведение следующих исследований:

- изучение механизмов и закономерностей процессов деградации полупроводниковых гетероструктур на основе нитрида галлия при протекании постоянного тока и в импульсном режиме;
- изучение деградации светодиодов на основе полупроводниковых InGaIn-гетероструктур при повышенных токах в постоянном и импульсном режимах;
- изучение деградации светодиодов на основе полупроводниковых InGaIn-гетероструктур при повышенных температурах;
- исследование процессов деградации полупроводниковых гетероструктур при температурах, близких к критической рабочей температуре *p-n*-перехода.

Целью таких исследований является изучение механизмов и закономерностей процессов деградации полупроводниковых гетероструктур на основе нитрида галлия при протекании постоянного тока и в импульсном режиме.

Исследования, результаты которых приводятся и обсуждаются в настоящей статье, проводились для кристаллов на основе InGaIn/GaN-гетероструктур с квантовыми ямами при постоянном токе и повышенных значениях окружающей температуры и плотности тока.

Таблица 1. Сравнение характеристик различных источников света

Тип источника света	Паспортная эффективность, лм/Вт	Реальная эффективность, лм/Вт	Ресурс, ч
Лампы накаливания	8–13	6–10	1000
Галогенные лампы	16–22	12–20	2000
Компактные люминесцентные лампы	50–70	35–50	10 000
Металлогалогенные лампы	60–100	<40	6000–15 000
Люминесцентные лампы	60–100	55–70	15 000
Полупроводниковые лампы (CREE XR-E)	100–110	90–100	>50 000
Натриевые лампы высокого давления	90–130	<50	15 000

История работ по деградации гетероструктур на основе GaN

Вопросам деградации полупроводниковых светодиодных структур на основе нитрида галлия в России стали уделять внимание во второй половине 1990-х годов, практически сразу после появления сверхъярких светодиодов на его основе. Одними из первых работ были совместные работы исследователей из МГУ им. М. В. Ломоносова и МИСиС [1]. В работах авторов были исследованы изменения спектров люминесценции и электрических свойств светодиодов на основе гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN в процессе длительной работы, предложены модели, объясняющие две стадии старения [1, 2]. Также было предположено, что дивакансии азота могут являться причиной желтой полосы в спектрах люминесценции нитрида галлия [2] и что с этим связано, в частности, увеличение относительной интенсивности этой полосы при длительной наработке в зеленых светодиодах на основе нитрида галлия.

С развитием разработок и исследований светодиодов в нашей стране проблемой их деградации занялись и другие группы исследователей. В 2005 году исследователи из ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН и СПбГТУ представили работы, в которых было изучено распределение интенсивности электролюминесценции по площади и во времени до и после оптической деградации голубых InGaIn/GaN-светодиодов [3]. Через два года, в 2007 году, исследователи из ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН совместно с разработчиками ведущего в России предприятия по полупроводниковым источникам света ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника» и исследователями из института проблем технологии и микроэлектроники РАН опубликовали работу, в которой проведено изучение закономерности деградации синих светодиодов на основе InGaIn/GaN [4].

Однако модели, описывающей деградацию светодиодов на основе InGaIn/GaN-гетероструктур, на сегодняшний день не существует.

Результаты исследования деградации

Для исследований использовались выборки кристаллов на основе InGaIn/GaN-гетероструктур с квантовыми ямами синего и зеленого цвета свечения. Размеры кристаллов составляют 300×300 мкм. Для каждой выборки отобраны кристаллы из одной части на исходной пластине. Кристаллы имеют примерно одинаковую силу света, одинаковое значение прямого напряжения при токе 20 мА и минимальную величину обратного тока (менее 1 мкА) при обратном напряжении 5 В. Такой выбор образцов был сделан для того, чтобы исключить влияние на результат таких факторов, как обратный ток и различные значения прямого напряжения. Очевидно, что в случае различия данных параметров образцов, деградация светодиодов будет различна [1, 3, 4]. В нашем случае изначально образцы подбирались примерно с одинаковыми параметрами.

Исследования проводились при повышенной температуре окружающей среды (55°C) и плотности тока, равной $90 \text{ A}/\text{cm}^2$.

Первые измерения были сделаны после 100 часов исследований. Затем измерения проводились после 300, 500 и 1000 часов.

Таблица 2. Результаты испытаний по ускоренной деградации светодиодов

Цвет свечения, материал	Относительные усредненные значения силы света $L^{\text{отн}}$, отн. ед.				
	$L^{\text{отн}}_{0 \text{ часов}}$	$L^{\text{отн}}_{100 \text{ часов}}$	$L^{\text{отн}}_{300 \text{ часов}}$	$L^{\text{отн}}_{500 \text{ часов}}$	$L^{\text{отн}}_{1000 \text{ часов}}$
Зеленый InGaIn	1,0	0,99	0,98	1,01	0,97
Синий InGaIn	1,0	1,12	1,18	1,28	1,25

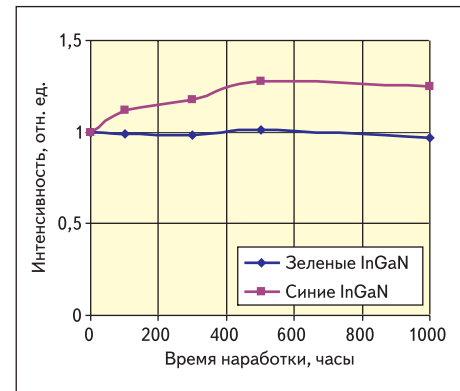


Рис. 1. Изменение интенсивности электролюминесценции синих и зеленых кристаллов на основе InGaIn/GaN-гетероструктур с квантовыми ямами от времени наработки за период 1000 часов при окружающей температуре 55°C и плотности тока $90 \text{ A}/\text{cm}^2$

В таблице 2 приведены результаты испытаний.

Зависимость изменения интенсивности от наработки приведена на рис. 1.

Хорошо видно, что данные по деградации, полученные из усреднения абсолютных значений и относительных значений силы света, совпадают, что объясняется малым разбросом значений силы света в пределах каждой выборки.

После 1000 часов деградации мы можем проследить четкую тенденцию поведения излучения кристаллов. Для синих кристаллов в течение 500 часов с начала исследования наблюдалось увеличение интенсивности электролюминесценции, которое составило за первые 100 часов примерно 12%, к 500 часам рост интенсивности составил 28% от начального значения, а за период от 500 до 1000 часов произошло небольшое снижение интенсивности (до 25% выше первоначального значения). Для зеленых кристаллов изменения интенсивности электролюминесценции в течение

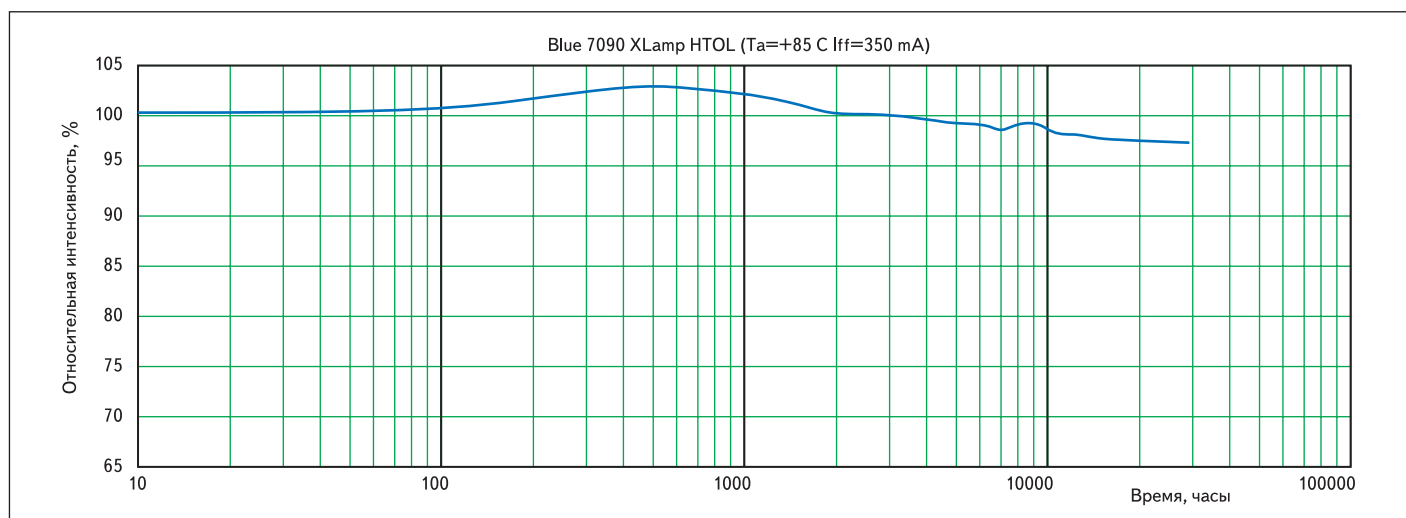


Рис. 2. Изменение интенсивности электролюминесценции синих кристаллов на основе InGaIn/GaN-гетероструктур с квантовыми ямами от времени наработки при окружающей температуре 85°C и плотности тока $35 \text{ A}/\text{cm}^2$

первых 500 часов практически не наблюдалось, а в период с 500 до 1000 часов произошло снижение интенсивности электролюминесценции примерно на 4%.

Результаты деградации, приведенные исследователями компании Cree при комнатной температуре и номинальном значении рабочего тока, представлены на рис. 2. Данные результаты приведены для синих кристаллов C460XB900 на основе InGaN/GaN-гетероструктур, выращенных методом газовой эпитаксии на подложках из карбида кремния. Размеры кристаллов составляют 300×300 мкм. Исследования проводились также при повышенной температуре (85 °С), а значение плотности тока было 35 А/см².

Из рис. 2 следует, что за первые 100 часов значение интенсивности света не изменяется. Далее за период от 100 часов до 140 часов наблюдается увеличение интенсивности электролюминесценции со 100% до 103%. Затем начинается спад интенсивности электролюминесценции, который продолжается до 10 000 часов, а затем выходит на насыщение при интенсивности, равной 97% от первоначального значения.

Обсуждение результатов деградации

Можно сделать оценку деградации через 10 000 часов для зеленых InGaN-гетероструктур. Если воспользоваться экспоненциальным законом деградации:

$$I(t) = I_0 e^{-\alpha t}, \quad (1)$$

где I_0 — начальное значение интенсивности электролюминесценции, α — коэффициент деградации, то получим коэффициент α , взяв в расчет изменение интенсивности света в течение 1000 часов деградации:

$$\alpha = -1/T \ln(I_T/I_0) = 3,05 \times 10^{-5}, \quad (2)$$

где $T = 1000$ часов — период наблюдения, I_T — интенсивность люминесценции в момент времени T . С помощью этого коэффициента можно получить оценку деградации интенсивности электролюминесценции зеленых кристаллов InGaN в течение 10 000 часов, которая составляет 26%.

Для синих кристаллов на основе InGaN-гетероструктур можно также оценить деградацию интенсивности для 10 000 часов, используя закон (1). Коэффициент α , рассчитанный по формуле (2) для этого случая, равен $4,74 \times 10^{-5}$. Оценка деградации интенсивности свечения синих кристаллов для наработки 10 000 часов, полученная с помощью этого коэффициента, составит примерно 17% от максимального значения.

Принимая во внимание ужесточенные условия испытаний — повышенное значение плотности тока, окружающую температуру 55 °С и, соответственно, повышенную тем-

пературу p - n -перехода гетероструктуры, равную приблизительно 123 °С вместо 83 °С при обычных условиях испытаний, можно предположить, что данное снижение интенсивности будет примерно соответствовать деградации гетероструктуры в течение 50 000 часов при температуре 25 °С. Основания для такого предположения следующие: 120 °С является критической температурой p - n -перехода и при температуре, превышающей это значение, процесс деградации быстро возрастает и может стать необратимым.

Данные по деградации мощных чипов, представленные компанией Cree, также можно оценить, воспользовавшись экспоненциальным законом (1). В этом случае коэффициент α , вычисленный согласно формуле (2), составит $2,03 \times 10^{-6}$. Следовательно, возможно сделать оценку деградации интенсивности свечения кристаллов Cree для 50 000 часов, воспользовавшись законом (1). Уменьшение значения интенсивности за этот период составит, согласно такой оценке, примерно 10% от начального значения.

Характер данной зависимости подтверждает ход кривых, полученных в экспериментах по изучению деградации синих и зеленых кристаллов на основе InGaN/GaN-гетероструктур с квантовыми ямами при повышенной температуре и плотности тока. Увеличение интенсивности электролюминесценции у синих кристаллов в первый период наработки наблюдалось в предыдущих исследованиях [1], где авторы объясняли это явление в предложенной модели активацией акцепторов Mg в p -слое GaN гетероструктуры при разрушении под действием инжекции носителей остаточных комплексов Mg-H, образующихся в процессе роста. Наблюдаемое большее увеличение интенсивности свечения при повышенной плотности тока может свидетельствовать, таким образом, о более эффективном процессе активации акцепторов в случае увеличения плотности тока через гетероструктуру. Следующее за этим снижение интенсивности электролюминесценции в течение последующего периода времени наработки также объяснялось в модели, предложенной авторами в работе [1], как образование донорных дефектов, компенсирующих акцепторы, и увеличивающих безызлучательную рекомбинацию и интенсивность свечения желтой полосы дефектов [2].

Аналогичные процессы, только выраженные в меньшей степени и в больший период времени, наблюдались авторами [1] и для зеленых кристаллов. Это согласуется с результатами, полученными в данной статье.

Видно, что оценка деградации интенсивности, сделанная при более высокой плотности тока, превосходит значения, наблюдаемые при низкой плотности тока. Это можно объяснить с учетом результатов, полученных в работе [3], согласно которым в процессе деградации на гетерограницах образуется диполь, связанный с неоднородностью

инжекции, влияние которого повышается при повышении плотности тока через гетероструктуру. Это свидетельствует о том, что основной причиной деградации интенсивности электролюминесценции гетероструктур является повышенная плотность тока, а не окружающая температура. Данный факт может объясняться тем, что неоднородности инжекции по площади гетерограницы приводят к локальным изменениям (в частности, к сильному локальному нагреву) и образованию дефектов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации [1,2].

В связи с этим следует отметить, что коэффициент α в формулах (1) и (2), строго говоря, зависит от плотности тока. Однако проявление этой зависимости сводится, как следует из сказанного выше, к локальному изменению температуры, то есть в некотором приближении можно свести данную зависимость к зависимости от температуры.

Также необходимо заметить, что обычно для качественной оценки электролюминесценции светодиодов используют величину квантового выхода, который, в свою очередь, может быть разделен на внутренний и внешний [1]. В данной статье оценка интенсивности излучения с точки зрения интегральных энергетических характеристик светодиодов, которые и являются показателем квантового выхода гетероструктуры, нами не приводится. Очевидно, что связь исследуемой в статье величины — интенсивности люминесценции, которую можно с определенной погрешностью сопоставить с силой света I_s , показывает лишь качественную зависимость изменения электролюминесценции в процессе деградации по причине перераспределения интенсивности излучения (светового потока) по геометрии кристалла (p - n -перехода) в процессе наработки. Это явление также только качественно было описано в работах [2, 3] — без приведения каких-либо количественных расчетов и только в области омических контактов. Последнее обстоятельство может иметь неоднозначную трактовку, как показано в проведенных позже исследованиях воздействия ультразвука при разварке контактных проводников в процессе сборки светодиодов [3] и существенной доли влияния этой операции именно на эффект, описанный в работе [3]. Учитывая сказанное, стоит еще раз подчеркнуть, что исследования, описанные в данной статье, проводились уже на готовых светодиодах, кристаллы которых подверглись операции разварки и, стало быть, при оценке причин деградации энергетики излучения рассматриваются эффекты, происходящие в структуре уже после воздействия разварки контактов.

Заключение

Полученные результаты деградации кристаллов на основе полупроводниковых InGaN/GaN-гетероструктур при повышен-

ных значениях тока и температуры в течение 1000 часов соответствуют результатам, полученным для данных гетероструктур в предыдущих работах, и находят объяснение при помощи моделей, предложенных в этих работах. Сделанные оценки деградации при наработке в 10 000 часов при повышенных значениях плотности тока и температуры показывают, что именно увеличение плотности тока более существенно влияет на деградацию кристаллов на основе InGaN/GaN-гетероструктур, так как приводит к неравномерному распределению температуры в гетероструктуре и, как следствие, ее локальному перегреву ее активной области. Этот факт не-

обходимо учитывать для определения оптимального режима работы как при разработке светодиодов, так и при проектировании светодиодных устройств. Однако выбор теплового режима тоже играет важную роль, поскольку влияние окружающей температуры также сказывается, хоть и в меньшей степени, на деградации оптических параметров светодиодных устройств. ■

Литература

1. Ковалев А. Н., Маняхин Ф. И., Кудряшов В. Е., Туркин А. Н., Юнович А. Э. Изменения люминесцентных и электрических свойств светодиодов из InGaN/AlGaIn/GaN при длительной работе. ФТП, 1999, том 33, вып. 2.
2. Юнович А. Э. Дивакансия азота — возможная причина желтой полосы в спектрах люминесценции нитрида галлия. ФТП, 1998, том 32, № 10.
3. Бочкарева Н. И., Ефремов А. А., Ребане Ю. Т., Горбунов Р. И., Клочков А. В., Шретер Ю. Г. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов. ФТП, 2006, том 40, вып. 1.
4. Васильева Е. Д., Закгейм А. Л., Снегов Ф. М., Черняков А. Е., Шмидт Н. М., Якимов Е. Б. Некоторые закономерности деградации синих светодиодов на основе InGaIn/GaN. Светотехника. 2007. № 5.