

Участие дефектов, локализованных на гетерограницах, и протяженных дефектов в деградации светоизлучающих приборов на основе нитридов

© Н.А. Тальнишних¹, А.Е. Иванов¹, Е.И. Шабунина², Н.М. Шмидт²

¹ НТЦ микроэлектроники РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: nadya.fel@mail.ru

Поступила в редакцию 19.05.2023 г.

В окончательной редакции 29.09.2023 г.

Принята к публикации 30.10.2023 г.

Экспериментально исследовано снижение внешней квантовой эффективности (ВКЭ) коммерческих светодиодов на основе квантоворазмерных структур InGaN/GaN на длину волны 445, 530 и AlGaN/GaN на 280 nm в стандартном режиме старения на постоянном токе. Выяснено, что снижение ВКЭ светодиодов (независимо от длины волны излучения) происходит в результате кооперативных явлений, развивающихся в 1-2 квантовых ямах (КЯ), находящихся в области объемного заряда (ООЗ) *p-n*-перехода, а также в большей части КЯ вне ООЗ. Показано, что неоднородное протекание тока в этих областях приводит не только к трансформации дефектов, локализованных на гетерограницах в ООЗ и в латеральных неоднородностях состава твердого раствора вне ООЗ, а также в протяженных дефектах, но и к изменению состава.

Ключевые слова: InGaN/GaN, дефекты, светодиоды, AlGaN/GaN.

DOI: 10.61011/OS.2023.11.57011.5209-23

Несмотря на впечатляющие успехи технологии светодиодов и лазеров на основе нитридов, проблема низкого срока службы лазеров и светодиодов зеленого и особенно ультрафиолетового диапазона не решена. Как отмечено в обзоре [1], во многом это связано с тем, что не выяснен механизм генерации дефектов под действием инжекционного тока и нет единого мнения о том, в какой части излучающих квантоворазмерных структур развивается этот процесс. Во многих работах в качестве основного механизма привлекается оже-рекомбинация, а также генерация точечных дефектов Шокли-Рида-Холла в активной области или в дислокациях и границах зерен.

В настоящей работе экспериментально выяснена роль разупорядоченности гетерограниц в развитии деградационного процесса в светодиодах на основе нитридов.

Исследования проводились на коммерческих светодиодах площадью 1 mm^2 с длинами волн излучения 280, 450 и 530 nm. Значения ВКЭ исследованных диодов составляли 3, 70 и 37% соответственно. Исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) светодиодов, спектры электролюминесценции (ЭЛ), зависимости ВКЭ и ширины спектров на полувысоте (FWHM) от плотности тока, распределения ВКЭ по длинам волн, зависимости спектральной плотности низкочастотного шума от частоты. Использован стандартный режим [1,2] старения при постоянной плотности тока $j = 35 \text{ A/cm}^2$ без подогрева для AlGaN/GaN-светодиодов и $j = 80 \text{ A/cm}^2$ с подогревом до 80°C .

Анализ экспериментальных данных, полученных в данной работе и в многочисленных опубликованных работах [1,3,4], показал, что снижение значений ВКЭ в максимуме светодиодов на основе нитридов (независимо от длины волны излучения) практически всегда сопровождается характерным изменением вида ВАХ (рис. 1, *a, б*) с увеличением времени старения.

При этом основное отличие заключается в существенном различии в величине времени старения, за которое ВКЭ падают в 2 раза, в величине ВКЭ до и после старения, а также в величине напряжения открытия *p-n*-перехода (U_{th}) светодиода до старения. Для исследованных в работе светодиодов U_{th} имеет следующие значения: 2.7 V для синего, 2.8 V для зеленого и 5.8 V для ультрафиолетового светодиодов. Превышение экспериментального значения U_{th} , по сравнению с U_{th} , соответствующему длине волны излучения светодиодов в максимуме, как известно [5], вызвано флуктуациями состава твердого раствора. Таким образом, максимальные флуктуации состава твердого раствора наблюдаются для ультрафиолетовых светодиодов. Ранее в нашей работе [6] было показано, что значения U_{th} увеличиваются на светодиодах с одинаковой длиной волны излучения, но с разной степенью упорядоченности гетерограниц и состава твердого раствора. Следует отметить, что изменения ВАХ в процессе старения наблюдаются при напряжении менее U_{th} , т.е. в квантовых ямах (КЯ), находящихся в ООЗ *p-n*-перехода, а транспорт носителей заряда — туннельный. Эволюция

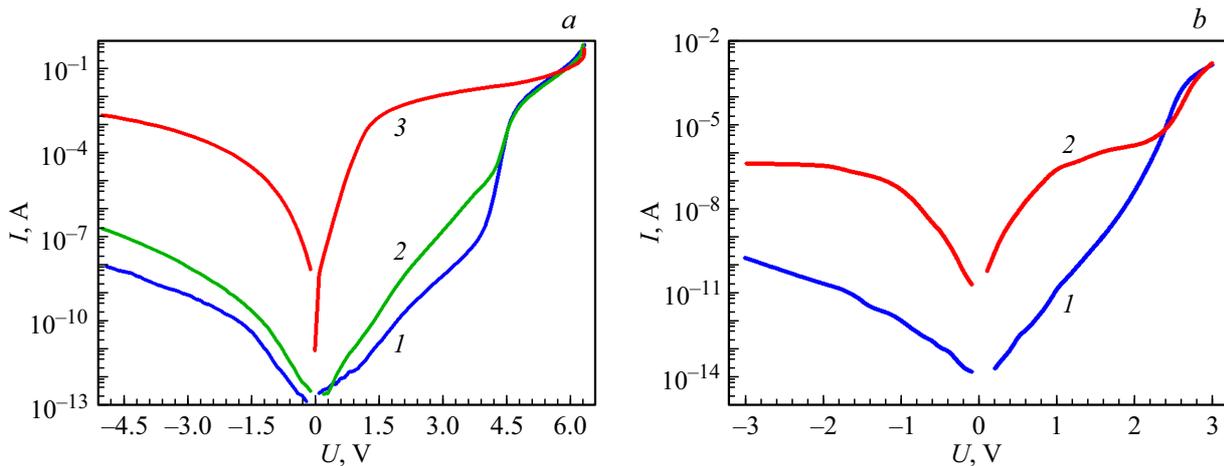


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики до и после старения для (а) AlGaIn/GaN-светодиода: 1 — до старения, ВКЭ — 3.2%; 2 — после 10 h старения, ВКЭ — 2.7%; 3 — после 25 h старения на постоянном токе, ВКЭ — 1.8% и (б) InGaIn/GaN-светодиода: 1 — до старения, ВКЭ — 60%; 2 — 10000 h старения на постоянном токе, ВКЭ — 40%.

обратной ветви отражает рост заряженных центров с увеличением времени старения (рис. 1), а рост фактора идеальности прямой ветви ($n > 2$) и ухудшение выпрямляющих свойств p - n -перехода позволяют предполагать участие дефектов, локализованных на гетерограницах и в флуктуациях состава твердого раствора, в снижении ВКЭ. Это предположение находит подтверждение в экспериментальных фактах, приведенных в нашей работе [6]. В ней показано, что ВАХ имеют такой же характерный вид, как на рис. 1, а (кривая 3) для светодиодов с плохо упорядоченными гетерограницами до деградации и низкими значениями ВКЭ в максимуме до деградации. Распределения значений ВКЭ по длинам волн в диапазоне токов $I = 4 - 1000$ mA и напряжений до и после старения на примере зеленого светодиода (рис. 2, а) отражают изменения, происходящие в КЯ, находящихся в ООЗ (область справа от красной линии на рис. 2, а) и в КЯ вне ООЗ под действием тока. Ранее [6] было выяснено, что вертикальная прямая линия на фиксированной длине волны (кривая 1 на рис. 2, а), визуализирует рост эффективной излучательной рекомбинации (ИР) из КЯ, находящихся в ООЗ p - n -перехода, а участки падения ВКЭ при $U > U_{th}$ (слева от красной линии) визуализируют процесс неравновесного заполнения носителями латеральных флуктуаций состава твердого раствора (СТР) в КЯ вне ООЗ. После старения (рис. 2, а, кривая 2) сдвигается максимум в более коротковолновую область и появляется слабая ИР в более длинноволновой области, а латеральные флуктуации СТР практически заполнены носителями. Эти изменения после старения (рис. 2, а, кривая 2) по существу визуализируют изменение СТР в КЯ, которые позволяют предполагать не только трансформацию и генерацию дефектов, но и локальную миграцию индия или галлия. Предположение о локальной миграции индия или галлия основано на механизме рекомбинационно-стимулированной диффузии

дефектов, обнаруженном в светоизлучающих приборах на основе GaAs, GaP, InP и развивающемся с повышением уровня инжекции неравновесных носителей заряда. Этот механизм описан во многих теоретических и экспериментальных работах, обобщенных в обзоре [7].

Наблюдаемые явления могут найти объяснение в рамках микроскопической теории разогрева локальных колебаний при многофононной рекомбинации [7,8]. Экспериментально выявленное усиление неоднородного протекания тока при старении (изменение наклона на участке зависимости $S_I(j)$ в светодиодах, рис. 2, б, кривая 2), нагрев светодиодов при $U > U_{th}$, неравновесное заполнение латеральных флуктуаций состава твердого раствора туннелирующими носителями заряда, локальный характер выделения металла на контактах на финальной стадии деградации являются весомыми аргументами в пользу участия рекомбинационно-стимулированных дефектных реакций в развитии деградации. Взаимодействие носителей заряда с латеральными флуктуациями состава приводит к снижению флуктуационного зонного потенциала. В результате происходит изменение механизма транспорта носителей заряда от туннельного к диффузионному, от латерального к вертикальному по проводящим каналам вне ООЗ. Неоднородное протекание тока подтверждается экспериментальными распределениями мощностных и спектральных характеристик по излучающей поверхности [9,10]. В результате повышается локальная плотность тока в проводящих каналах, таких как дефекты упаковки, границы зерен, дислокации, и становится возможным процесс многофононной рекомбинации носителей заряда в протяженных дефектах с локальной передачей энергии, достаточной для конфигурационной перестройки и миграции дефектов. Этот механизм приводит не только к снижению значений ВКЭ, но и к выходу из строя светоизлучающих приборов. Экспериментальным подтверждением является локаль-

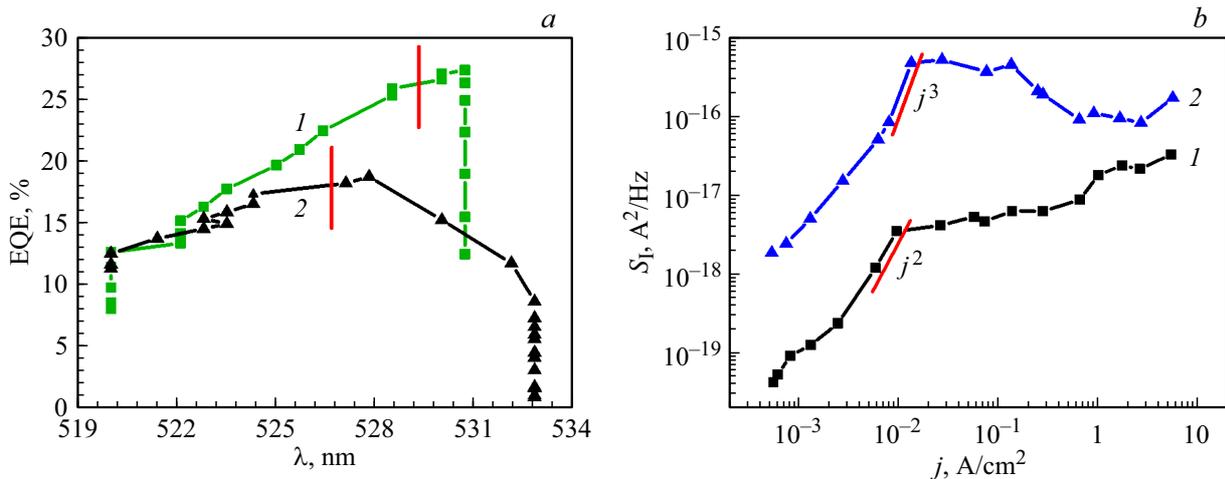


Рис. 2. (a) Распределение значений ВКЭ по длинам волн для зеленых светодиодов: 1 — до старения, 2 — после 3000 h. (b) Зависимость спектральной плотности низкочастотного токового шума от плотности тока в синем светодиоде: 1 — до деградации, 2 — после 3000 h старения. Падение ВКЭ без изменения длины волны наблюдается на постоянном токе и в импульсном режиме при плотностях тока более 40 А/см², предположительно вызвано разогревом в результате рекомбинационно-стимулированных дефектных реакций [7].

ное выделение галлия или индия в деградировавших приборах [10].

Проведенные исследования позволили выяснить, что снижение ВКЭ светодиодов на основе нитридов при старении вызвано процессами не только трансформации дефектов, локализованных на гетерограницах КЯ, находящихся в области объемного заряда (ООЗ) *p-n*-перехода, но и изменением состава твердого раствора в его латеральных неоднородностях. Трансформация дефектов сопровождается характерным изменением вида ВАХ светодиодов и ухудшением их выпрямляющих свойств. Причем эти изменения вида ВАХ практически не зависят от состава твердого раствора светодиодов и режима испытаний на срок службы. Однако время достижения этих изменений может отличаться для светодиодов с отличающимся составом твердого раствора на порядки.

Благодарности

Измерения световых параметров выполнены в ЦКП „Элементная база радиофотоники и нанoeлектроники: технология, диагностика, метрология“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J. Rusche, J. Glaab, M. Brendel, J. Rass, C. Stolmacker, N. Lobo-Ploch, T. Kolbe, T. Wernicke, F. Mehnke, J. Enslin, S. Einfeldt, M. Weyers, M. Kneissl. *J. Appl. Phys.*, **124** (8), 084504 (2018). DOI: 10.1063/1.5028047

[2] Y-F. Su, S-Y. Yang, T-Y. Hung, C-C. Lee, K-N. Chiang. *Microelectronics Reliability*, **52** (5), 794–803 (2012). DOI: 10.1016/j.microrel.2011.07.059

[3] N. Renso, C. De Santi, A. Caria, F. Dalla Torre, L. Zecchin, G. Meneghesso, E. Zanoni, M. Meneghini. *J. Appl. Phys.*, **127** (18), 185701 (2020). DOI: 10.1063/1.5135633

[4] Ф.И. Маняхин. *ФТП*, **52** (3), 378–384 (2018). DOI: 10.21883/ФТП.2018.03.45625.8341

[5] F.E. Schubert. *Light-emitting diodes*, 2nd ed. (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2006), p. 415.

[6] Е.И. Шабунина, А.Е. Черняков, А.Е. Иванов, А.П. Карташова, В.И. Кучинский, Д.С. Полоскин, Н.А. Тальнишних, Н.М. Шмидт, А.Л. Закгейм. *Прикладная спектроскопия*, **90** (1), 29 (2023). DOI: 10.47612/0514-7506-2023-90-1-29-34

[7] В.Н. Абакумов, А.А. Пахомов, И.Н. Ясевич. *ФТП*, **25** (9), 1489–1515 (1991).

[8] С.В. Булярский, Н.С. Грушко. *Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах* (Издательство Московского университета, М., 1995).

[9] А.Л. Закгейм, А.Е. Иванов, А.Е. Черняков. *Письма в ЖТФ*, **47** (16), 32–35 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.16.51326.18795

[10] K.N. Tu, Yingxia Liu, Menglu Li. *Appl. Phys. Rev.*, **4** (1), 011101 (2017). DOI: 10.1063/1.4974168