

07

Низкочастотный шум в светодиодах на основе InGaN/GaN квантовых ям при электрических воздействиях, сопровождающихся возрастанием внешней квантовой эффективности

© А.М. Иванов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: alexandr.ivanov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 28 декабря 2018 г.
В окончательной редакции 5 июля 2020 г.
Принято к публикации 20 июля 2020 г.

Представлены результаты тестирования деградации светодиодных структур с квантовыми ямами InGaN/GaN. Наблюдалось увеличение внешней квантовой эффективности выше исходной величины после пропускания тока 150–170 мА. Рассмотрены возможные физические процессы, приводящие к изменению квантовой эффективности и росту низкочастотного шума.

Ключевые слова: деградация светодиодов, возрастание квантовой эффективности, низкочастотный шум.

DOI: 10.21883/JTF.2021.01.50276.447-18

Введение

В последнее время достигнут значительный прогресс в совершенствовании оптоэлектронных и электронных приборов на основе нитридных материалов; при этом механизмы деградации полупроводниковых светодиодов и лазеров и возможности их нейтрализации вызывают исследовательский интерес, поскольку в литературе нет единого представления об этих процессах.

В литературе деградацию светодиодов связывают с образованием дефектов как в самих активных областях [1,2], так и в области барьеров к ним [3,4]. В первую очередь это дефекты, ответственные за безызлучательную рекомбинацию; увеличение дефектов в барьерах сокращает конфайнмент носителей заряда в квантовой яме и способствует их перетеканию из нее при больших уровнях инжекции [5]. В долговременной деградации важную роль играет миграция примесей, таких как Н и Mg, в активную область [1,6] или по направлению к активной области [4].

Высокая плотность дефектов обуславливает увеличенный уровень токового шума. В транзисторах с высокой подвижностью электронов (HEMT-транзисторах) на основе GaN увеличение плотности шума сопровождается ростом туннельного тока утечки затвора на основе барьера Шоттки [7].

Низкочастотный шум является чувствительным индикатором деградационных процессов в полупроводниках. Избыточный уровень шума содержит информацию о степени и скорости деградации твердотельных электронных приборов [8]. По измерениям его мощности и спектрального состава прогнозируют их надежность.

В InGaN/GaN светодиодах деградация при номинальном токе проявляется в падении оптической мощности и внешней квантовой эффективности, которая сопровож-

далась ростом плотности токового шума [9,10], что предполагает общую физическую природу этих процессов.

Целью настоящей работы являлось изучение процессов начальной стадии деградации светодиодов с квантовыми ямами InGaN/GaN. Для имитации деградации параметров светодиодов в рабочем режиме использовалось ускоренное старение. Для этого светодиоды при прямом смещении подвергались воздействию токами от 60 до 170 мА, приводящему одновременно к джоулеву разогреву. Была обнаружена обратимость процесса старения: после падения эффективности наблюдалось ее увеличение на 20% по сравнению с исходной величиной и возврат к начальным значениям при хранении на воздухе при комнатных температурах. Рост эффективности светодиодов сопровождался возрастанием плотности токового шума [11]. Подобная двойственная связь изменения эффективности и низкочастотного шума допускает метастабильность образующихся дефектов и позволяет исследовать возможности воздействия на спектр дефектов с целью уменьшения скорости безызлучательной рекомбинации, сохранения эффективности, увеличения срока службы светодиодов.

1. Описание эксперимента

В настоящей работе представлены результаты экспериментов с $p\text{-AlGaIn}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}n\text{-GaIn}$ синими светодиодами фирмы Nichia (NSPB-300) с номинальными токами $J = 20 \text{ mA}$ (реальная площадь диодов составляет $\sim 10^{-3} \text{ cm}^2$) и пиковой энергией излучения 2.7 eV [12,13]. Максимальная внешняя квантовая эффективность этих диодов определялась с помощью интегри-

Тестирование светодиодов при прямом смещении

Стадии тестирования	Ток J , mA	Продолжительность t , h	Мощность W , W	Минимальный перегрев ΔT , °C	η/η_{init} , %
I	150	1	0.585	104.9	100
II	150	1	0.585	104.9	82
III	150	0.5	0.585	104.9	114
IV	160	0.5	0.656	118.2	94
V	171	0.33	0.735	133.1	105

рующей сферы и калиброванного фотодиода ФДУК-2У и составила $\eta_p = 15\%$ [12,14].

Измерения световых, токовых, частотных и шумовых характеристик осуществлялись с помощью полуавтоматической установки. Для оценки изменений относительных плотностей потока излучения и внешней квантовой эффективности использовался фотодиод.

Измерительный прибор (аналого-цифровой преобразователь с собственным уровнем шумов $1\mu V$) давал возможность фиксировать временную зависимость флуктуаций напряжения на нагрузочном сопротивлении $R_L = 100\ \Omega$ в полосе частот $10\text{ Hz} - 7.3\text{ kHz}$. В измерениях записывались $2 \cdot 10^6$ выборок с частотой дискретизации 16 kHz . Шум рассчитывался с использованием быстрого преобразования Фурье в четырех полосах равной ширины 17.6 Hz с центральными частотами $20, 70, 270$ и 1000 Hz . Флуктуации тока короткого замыкания вычислялся как $\delta J = \delta J_{meas}(1 + R_L/r_d)$, где δJ_{meas} — измеряемые флуктуации тока, возникающие при пропускании постоянного тока через светодиод; r_d — дифференциальное сопротивление светодиода.

Для тестирования светодиодов на возможность изменения квантовой эффективности при деградации использовался режим прямого постоянного смещения, и одновременно измерялись вольт-амперные характеристики, токовые и спектральные зависимости плотности шума. Длительности тестов варьировались от нескольких минут до нескольких часов при токах в диапазоне от 60 до 170 mA . Рост эффективности в разных приборах при тесте $J = 150\text{ mA}$, 1 h был в диапазоне от 8 до 21% по сравнению с исходными светодиодами.

Расстояние между теплоотводом и ограничителями на выводах светодиода было 11 mm . Рассчитанное тепловое сопротивление между теплоотводом и активной областью составляло $R_{j-a} = 200\text{ K/W}$ [15,16]. Перегрев активной области ΔT вычислялся как $\Delta T = (1 - \eta_{power})WR_{j-a}$ (η_{power} — коэффициент полезного действия светодиода [17], W — потребляемая мощность). При напряжении на светодиоде $U = 3.9\text{ V}$ и $J = 150\text{ mA}$ $\Delta T = 105^\circ\text{C}$. Так как для оценки перегрева использовалось максимальное значение η_p , в таблице представлены его минимальные величины, характеризующие дополнительный разогрев прибора.

2. Результаты эксперимента

Воздействия током (80 mA в течение 1.2 h , 105 mA — 3 h и 120 mA — 3 h) не вызывали существенных изменений внешней квантовой эффективности. На рис. 1, *a* представлены результаты изменения эффективности исследуемых светодиодов от величины прошедшего через светодиод количества электричества. График показывает, что эффективность не изменялась до теста с $J = 150\text{ mA}$.

Продолжительности воздействий при $J = 150 - 170\text{ mA}$, сопровождающиеся перегревом активной области $> 100^\circ\text{C}$, составляли не больше часа. После каждой стадии измерялась квантовая эффективность при токе $J \approx 20\text{ mA}$ (впоследствии, если не оговорено особо, измерения выполнялись при этом токе). Было обнаружено чередование стадий уменьшения эффективности (максимально на 18%) с последующим ее возрастанием до значений, превышающих эффективность светодиода до воздействия (максимально на 21%). В таблице приведен пример изменения квантовой эффективности $\eta(\eta/\eta_{init})$, где η_{init} — эффективность исходного образца) при воздействиях с использованием максимальных токов.

На рис. 1, *b* приведен пример изменения эффективности после трех идентичных стадий воздействия $J = 150\text{ mA}/1\text{ h}$. Рост квантовой эффективности после ее падения (на первой стадии) происходил практически равномерно во всем рабочем диапазоне токов светодиода и составил 8% после второй и третьей стадий по сравнению с исходной эффективностью. На вставке к рис. 1, *b* представлены результаты для двух образцов с максимальным возрастанием эффективности в светодиодах (на 14 и 21%) после воздействия $J = 150\text{ mA}/2.5\text{ h}$ (воздействие состояло из трех стадий: $150\text{ mA}/1\text{ h}$, $150\text{ mA}/1\text{ h}$, $150\text{ mA}/0.5\text{ h}$), а также (на 5%) после стадии $J = 171\text{ mA}/0.33\text{ h}$.

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики двух светодиодов $J(U)$ после воздействий $J = 150\text{ mA}$. Из вольт-амперных характеристик рассчитывались зависимости тока от напряжения на $p-n$ -переходе $J(U_j)$, $U_j = U - J \cdot r_s$. Зависимости $J(U_j)$ могут быть аппроксимированы экспоненциальной функцией $J \propto \exp(qU_j/n_j(U_j)kT)$, где kT — тепловая энергия, q — элементарный заряд, $n_j(U_j)$ — фактор идеальности (проявляет механизмы рекомбинации [18] и особенности протекания тока [19]). Рост эффективности сопровождался уменьшением рабочего напряжения (кривые 2', 3). Последовательное сопротивление r_s оценивалось из линейной области вольт-амперных характеристик. На вставке к рис. 2 представлены зависимости дифференциального сопротивления светодиода $r_d = r_j + r_s$ от тока (r_j — дифференциальное сопротивление перехода) до и после воздействия $J = 150\text{ mA}/2.5\text{ h}$, а также после 16 суток выдержки (в дальнейшем сокращенно — хранение). Так как измерения проводились в пределах номинального (рабочего) тока светодиодов 20 mA , увеличение температуры активной области с ростом тока невелико ($\sim 10\text{ K}$ при номинальном токе [11]).

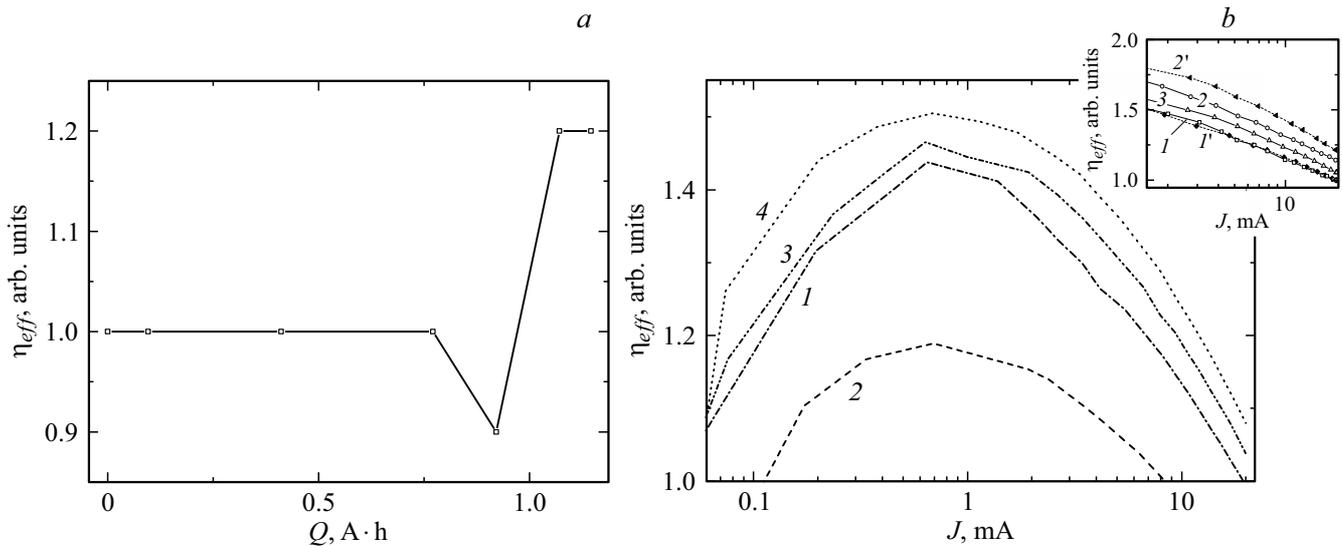


Рис. 1. Зависимости квантовой эффективности: *a* — от количества электричества, прошедшего через светодиод; *b* — от тока при прямом смещении диода до (*I*) и после трех последовательных воздействий током (*2–4*): *2* — 150 мА/1 ч, *3* — 150 мА/1 ч, *4* — 150 мА/1 ч. На вставке к рис. 1, *b* — зависимости квантовой эффективности от тока при прямом смещении двух диодов до (*I, I'*) и после воздействия током (*2, 2', 3*): *2, 2'* — 150 мА/2.5 ч, *3* — 171 мА/0.33 ч; *I–3* соответствуют таблице.

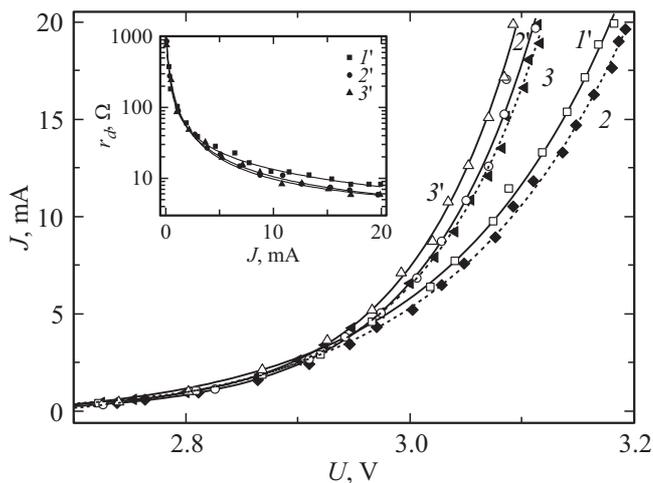


Рис. 2. Зависимости тока от напряжения $J(U)$ двух диодов до (*I'*) и после воздействия током (*2, 3, 2', 3'*): *2* — 150 мА/1 ч, *3* — 150 мА/1 ч; *2'* — 150 мА/2.5 ч, *3'* — хранения (*2, 3* соответствуют рис. 1, *b*; *I', 2'* — рис. 1, *b*, вставка). На вставке к рис. 2: зависимость от тока дифференциального сопротивления светодиода r_d до (*I'*) и после воздействия током (*2', 3'*): *2'* — 150 мА/2.5 ч, *3'* — хранения.

На рис. 3, *a* представлены результаты измерения зависимости спектральной плотности токового шума $S_J(J)$ для частот $f = 20$ и 1000 Гц светодиода до (кривые *1, 2*) и после воздействия $J = 150$ мА/2.5 ч (кривые *I', 2'*). Плотность токового шума растет с понижением частоты. При $J \sim 1$ мА рост спектральной плотности токового шума с увеличением тока близок к линейному $S_J \propto J$. После воздействия при $J > 3$ мА $S_J(J)$ растет с током

быстрее и превосходит в 5 и более раз спектральную плотность токового шума в исходном светодиоде для обеих частот. Для тока $J > 10$ мА зависимость от тока становится близкой к $S_J \propto J^3$ (до воздействия $S_J \propto J^{1.5}$).

На рис. 3, *b* представлена спектральная плотность токового шума $S_J(J)$ для частот 20 и 1000 Гц для светодиода до воздействия (кривые *1, 2*) и после воздействия $J = 150$ мА/2.5 ч и хранения (кривые *I', 2'*). Подобно рис. 3, *a*: $S_J \propto J$ при $J \sim 1$ мА, а для токов $J > 3$ мА после хранения наблюдается рост S_J и $S_J \propto J^{2.3}$ для обеих частот; величина S_J при рабочих токах имеет промежуточное значение между плотностью токового шума до и после воздействия $J = 150$ мА/2.5 ч (рис. 3, *a*).

На рис. 4 представлены частотные зависимости плотности шума $S_J(f)$ для светодиодов до и после воздействия $J = 150$ мА/2.5 ч, а также после хранения, измеренные при номинальном токе $J = 20$ мА. Для всех трех частотных спектров на начальном участке зависимость $S_J(f)$ близка к зависимости $S_J \propto 1/f^2$. С ростом частоты при $f > 500$ Гц плотность шума очень слабо зависит от частоты (кривая *1*).

3. Обсуждение результатов

Большинство авторов, исследующих деградацию светодиодов и лазеров на основе нитридных материалов, объясняют ее изменениями, происходящими с легирующими примесями и точечными дефектами в активных и прилегающих к ним областях [2, 20–26]. На самых начальных этапах процесс изменений может протекать в условиях конкуренции процессов, приводящих как к падению, так и росту оптической энергии и квантовой эффективности (рис. 1, *a*).

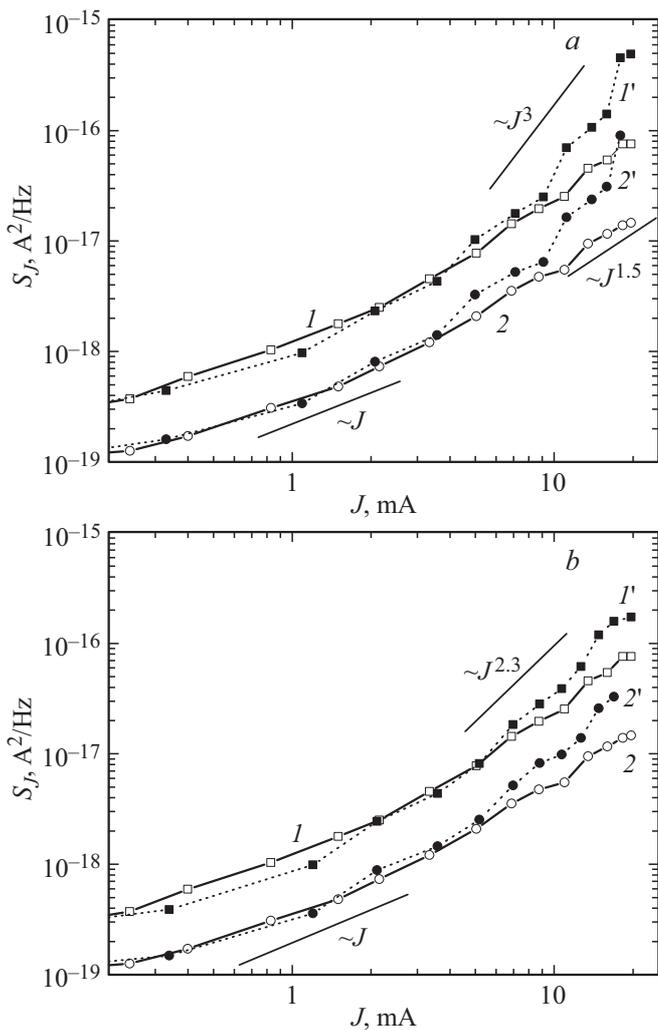


Рис. 3. Зависимости спектральной плотности токового шума $S_J(J)$ для различных частот анализа до (1, 2) и после воздействия током (1', 2') *a* — 1', 2' — 150 мА/2,5 ч; *b* — 1', 2' — хранения. Частота анализа f , Гц: 1, 1' — 20, 2, 2' — 1000.

Изменения мощности оптического излучения светодиодов в процессе имитации деградации параметров светодиодов связаны с активацией акцепторной примеси Mg, которая увеличивает p -проводимость и эффективность инжекции дырок [26]. Одновременно происходит компенсация донорных примесей акцепторными дефектами и примесями. Углерод на месте азота (C_N), как и Mg, действует как компенсирующий центр в n -GaN [25]. Активное участие H связано с его высокой подвижностью, формированием нейтральных комплексов с Mg и другими негативно заряженными точечными дефектами, заполнением оборванной связи вакансии галлия (V_{Ga}) [27].

Основным механизмом падения эффективности светодиодов на нитридных материалах при деградации является генерация как в активной области, так в прилегающих барьерах, центров безызлучательной Shockley–Read–Hall (SRH) рекомбинации [28,29].

В InGaN комплексы $V_{Ga}-3H$ и $V_{Ga}-ON-2H$ действуют как эффективные SRH рекомбинационные центры [25]. Согласно уравнению непрерывности [21,30], в установившихся условиях скорость эмиссии фотонов определяется как

$$L = Bn^2 = I/qd - An,$$

где A и B — коэффициенты безызлучательной и излучательной рекомбинации, I — плотность тока, d — толщина активного слоя, n — концентрация носителей. Коэффициент A пропорционален плотности дефектов, сечению захвата и тепловой скорости носителей и связан с дефектностью в активной области [2,22,26]; в совершенном материале без безызлучательной рекомбинации $A \rightarrow 0$ [18]. Изменения в концентрации и спектре точечных дефектов влияют на величину L . Измерения методом релаксационной спектроскопии (DLTS-измерения) показывают, что рост скорости безызлучательной рекомбинации связан с образованием более глубоких уровней в активных районах, например накоплением центров с энергией E_c 2.25 (2–3.5) eV [24]. Обычно исследования не претендуют на точное установление области деградации и того, какие дефекты ответственны за падение оптической мощности [25,26].

Рост эффективности (рис. 1) при воздействиях токами при прямом смещении связан с процессами, противоположными деградации [21]. Таким процессом выступает увеличение легирования p -областей за счет активации Mg [31] и развала дефекта Mg–H [3]. Это приводит к уменьшению рабочего напряжения при номинальном токе [26] (рис. 2). Изменения в спектре дефектов под воздействием тока и джоулевого нагрева вызывают уменьшение концентрации центров с более глубокими уровнями, ответственных за рекомбинацию Шокли–Рида–Холла (SRH-рекомбинацию), и проявление более мелких дефектов [11], чей вклад в безызлучательную рекомбинацию слабее. Позитивные изменения насыщаются, и

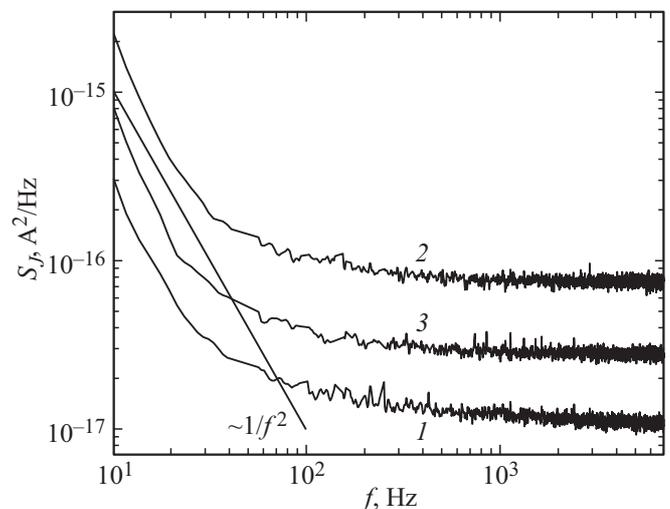


Рис. 4. Частотные зависимости спектральной плотности токового шума до (1) и после воздействия током (2, 3): 2 — 150 мА/2,5 ч, 3 — хранения. Ток, мА: 1–3 — 20.

после определенного времени воздействия доминирующим фактором становится накопление дефектов и старение [21].

Одновременно с ростом эффективности наблюдается рост плотности низкочастотного шума (рис. 3, 4). Это связано с тем, что возникающие более мелкие дефекты, уменьшая скорость безызлучательной рекомбинации, одновременно участвуют в формировании низкочастотного шума. Наличие лоренцевской составляющей в спектральной зависимости плотности шума (т.е. $\propto 1/f^2$, рис. 4) предполагает сложение нескольких механизмов его формирования — возможны фликкер-шум, телеграфный шум [32], генерационно-рекомбинационный, связанный с вертикальными по энергии переходами между центрами и свободными зонами [33,34]. Токовые флуктуации обусловлены случайным распределением центров как по площади, так и по глубине в запрещенной зоне.

Согласно гипотезе Хоуге [35], спектральная плотность токового шума определяется средним числом электронов \bar{N} , принимающих участие в проводимости:

$$S_J = \frac{\alpha}{f\bar{N}} J^2,$$

где α — постоянная Хоуге. Одновременное действие тока и джоулев разогрев могут вызывать неоднородность распределения носителей по площади при протекании тока или деградацию в тонком слое морфологии светодиода с соответствующими изменениями количества носителей и сопротивления протеканию тока. Плотность токового шума значительно более чувствительна к начальным стадиям этих явлений, чем последовательное сопротивление [32]. Резкий рост плотности шума ($S_J \propto J^3$) (рис. 3, *a*) связан с неравномерностью прохождения тока и формированием новых дефектов [36], которые могут возникать как в активной области, так и пассивных районах [37].

При хранении образца при комнатных условиях квантовая эффективность практически вернулась к исходной, что можно связать с обратимостью перестройки центров (метастабильный характер дефектов, восстановление связей, обратная миграция). В то же время плотность низкочастотного шума (рис. 3, *b*) и дифференциальное сопротивление (вставка на рис. 2, *a*) сохранили свое различие в области токов $J > 3$ мА с зависимостями для исходного, не подвергнутого воздействию образца. Это свидетельствует о возможном проявлении дополнительных механизмов формирования низкочастотного шума, уменьшении надежности и срока службы светодиода и требует специальных экспериментов по долговременному старению исследованных светодиодов.

Заключение

Измерения токовых зависимостей интенсивности излучения показали, что в результате действия токов ≥ 150 мА эффективность светодиодов на основе

InGaN/GaN квантовых ям может увеличиваться на 20% по сравнению с начальной величиной. Электрические токи, примененные в работе, сопровождающиеся джоулевым разогревом образцов, вызывали активацию примесей и изменения в концентрации и спектре точечных дефектов в запрещенной зоне полупроводника, что сопровождалось ростом внешней квантовой эффективности (в противоположность наблюдаемому в большинстве случаев уменьшению оптической мощности при деградации) и увеличением плотности низкочастотного шума. Строгой корреляции между изменениями эффективности и уровня низкочастотного шума в светодиодах установить не удалось.

Понимание природы наблюдаемых изменений в светодиодах на нитридных материалах позволит замедлять процессы старения. Наиболее интересны положительные изменения на начальном этапе, приводящие к росту эффективности. Активация Mg увеличивает инжекцию в активную область. Этот эффект предполагает конструктивные решения (блокирующие и резервуарные слои [38–40]), направленные на увеличение количества носителей в квантовых ямах. Полученные результаты нашли подтверждение в экспериментах по деградации УФ светодиодов и будут представлены в последующих работах.

Благодарности

Автор выражает благодарность А.В. Ключкову за участие в работе и ценные замечания.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. La Grassa, M. Meneghini, C. De Santi, M. Mandurrino, M. Goano, F. Bertazzi, R. Zeisel, B. Galler, G. Meneghesso, E. Zanoni. *Microelectronics Reliability*, **55**, 1775 (2015).
- [2] D. Monti, M. Meneghini, C. De Santi, G. Meneghesso, E. Zanoni. *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, **16** (2), 213 (2016).
- [3] C.G. Moe, M.L. Reed, G.A. Garrett, A.V. Sampath, T. Alexander, H. Shen, M. Wraback, Y. Bilenko, M. Shatalov, J. Yang, W. Sun, J. Deng, R. Gaska. *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 213512 (2010).
- [4] C. De Santi, M. Meneghini, G. Meneghesso, E. Zanoni. *Microelectronics Reliability*, **64**, 623 (2016).
- [5] N. Trivellin, D. Montia, C. De Santi, M. Buffolao, G. Meneghesso, E. Zanoni, M. Meneghinia. *Microelectronics Reliability*, **88–90**, 868 (2018).
- [6] M. La Grassa, M. Meneghini, C. De Santi, E. Zanoni, G. Meneghesso. *Microelectronics Reliability*, **64**, 614 (2016).
- [7] Z. Yatabe, J.T. Asubar, T. Hashizume. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **49**, 393001 (2016).
- [8] Б.И. Якубович. *Надежность*, **17** (2), 31 (2017). [B.I. Yakubovich. *Dependability*, **17** (2), 31 (2017). (In Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2017-17-2-31-35>]

- [9] Н.И. Бочкарева, А.М. Иванов, А.В. Клочков, В.С. Коготков, Ю.Т. Ребане, М.В. Вирко, Ю.Г. Шретер. *ФТП*, **49** (6), 847 (2015). [N.I. Bochkareva, A.M. Ivanov, A.V. Klochkov, V.S. Kogotkov, Y.T. Rebane, M.V. Virko, Y.G. Shreter. *Semicond.*, **49** (6), 827 (2015).]
- [10] Н.И. Бочкарева, А.М. Иванов, А.В. Клочков, Ю.Г. Шретер. *ФТП*, **53** (1), 104 (2019). [N.I. Bochkareva, A.M. Ivanov, A.V. Klochkov, Y.G. Shreter. *Semicond.*, **53** (1), 99 (2019).]
- [11] Н.И. Бочкарева, А.М. Иванов, А.В. Клочков, В.А. Тарала, Ю.Г. Шретер. *Письма в ЖТФ*, **42** (22), 1 (2016). [N.I. Bochkareva, A.M. Ivanov, A.V. Klochkov, V.A. Tarala, Y.G. Shreter. *Tech. Phys. Lett.*, **42** (11), 1099 (2016).]
- [12] N.I. Bochkareva, V.V. Voronenkov, R.I. Gorbunov, A.S. Zubrilov, Y.S. Lelikov, P.E. Latyshev, Y.T. Rebane, A.I. Tsyuk, Y.G. Shreter. *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 133502 (2010).
- [13] S. Nakamura, M. Senon, N. Iwasa, S. Nagahama, T. Yamada, T. Mukai. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, L 1332 (1995).
- [14] Н.И. Бочкарева, Ю.Т. Ребане, Ю.Г. Шретер. *ФТП*, **49** (12), 1714 (2015). [N.I. Bochkareva, Y.T. Rebane, Y.G. Shreter. *Semicond.*, **49** (12), 1665 (2015).]
- [15] А.А. Ефремов, Н.И. Бочкарева, Р.И. Горбунов, Д.А. Лавринович, Ю.Т. Ребане, Д.В. Тархин, Ю.Г. Шретер. *ФТП*, **40** (5), 621 (2006). [A.A. Efremov, N.I. Bochkareva, R.I. Gorbunov, D.A. Lavrinovich, Y.T. Rebane, D.V. Tarkhin, Y.G. Shreter. *Semicond.*, **40** (5), 605 (2006).]
- [16] Н.И. Бочкарева, Р.И. Горбунов, А.В. Клочков, Ю.С. Леликов, И.А. Мартынов, Ю.Т. Ребане, А.С. Белов, Ю.Г. Шретер. *ФТП*, **42** (11), 1384 (2008). [N.I. Bochkareva, R.I. Gorbunov, A.V. Klochkov, Y.S. Lelikov, I.A. Martynov, Y.T. Rebane, A.S. Belov, Y.G. Shreter. *Semicond.*, **42** (11), 1355 (2008).]
- [17] Ф. Шуберт. *Светодиоды* (Физматлит, М., 2008).
- [18] A. David, C.A. Hurni, N.G. Young, M.D. Craven. *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 083501 (2016).
- [19] D. Zhu, J. Xu, A. Noemaun, J. Kim, E. Schubert, M. Crawford, D. Koleske. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 081113 (2009).
- [20] G. Meneghesso, M. Meneghini, E. Zanoni. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43**, 354007 (2010).
- [21] J. Hu, L. Yang, M.W. Shin. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 035107 (2008).
- [22] M. Meneghini, G. Meneghesso, N. Trivellin, E. Zanoni, K. Orita, M. Yuri, D. Ueda. *IEEE Electron Device Lett.*, **29** (6), 578 (2008).
- [23] M. Meneghini, N. Trivellin, K. Orita, S. Takigawa, M. Yuri, T. Tanaka, D. Ueda, E. Zanoni, G. Meneghesso. *IEEE Electron Device Lett.*, **30** (4), 356 (2009).
- [24] D. Monti, M. Meneghini, C. De Santi, G. Meneghesso, E. Zanoni, J. Glaab, J. Rass, S. Einfeldt, F. Mehnke, J. Enslin, T. Wernicke, M. Kneissl. *IEEE Trans. Electron Devices*, **64** (1), 200 (2017).
- [25] J. Glaab, J. Haefke, J. Ruschel, M. Brendel, J. Rass, T. Kolbe, A. Knauer, M. Weyers, S. Einfeldt, M. Guttmann, C. Kuhn, J. Enslin, T. Wernicke, M. Kneissl. *J. Appl. Phys.*, **123**, 104502 (2018).
- [26] J. Glaab, J. Ruschel, T. Kolbe, A. Knauer, J. Rass, H.K. Cho, N. Lobo Ploch, S. Kreuzmann, S. Einfeldt, M. Weyers, M. Kneissl. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **31** (7), 529 (2019).
- [27] E. Fabris, M. Meneghini, C. De Santi, Z. Hu, W. Li, K. Nomoto, X. Gao, D. Jena, H.G. Xing, G. Meneghesso, E. Zanoni. *Microelectronics Reliability*, **88–90**, 568 (2018).
- [28] C. De Santi, M. Meneghini, N. Trivellin, S. Gerardin, M. Bagatin, A. Paccagnella, G. Meneghesso, E. Zanoni. *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 213506 (2014).
- [29] T.T. Chen, C.P. Wang, H.K. Fu, P.T. Chou, S.P. Ying. *Opt. Express*, **22** (S5), A1328 (2014).
- [30] K.C. Yung, H. Liem, H.S. Choy, W.K. Lun. *J. Appl. Phys.*, **109**, 094509 (2011).
- [31] J. Fu, L. Zhao, H. Cao, X. Sun, B. Sun, J. Wang, J. Li. *AIP Advances*, **6**, 055219 (2016).
- [32] S. Bychikhin, D. Pogany, L.K.J. Vandamme, G. Meneghesso, E. Zanoni. *J. Appl. Phys.*, **97**, 123714 (2005).
- [33] Н.В. Дьяконова, М.Е. Левинштейн, С.Л. Румянцев. *ФТП*, **25** (12), 2065 (1991). [N.V. D'yakonova, M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev. *Sov. Phys. Semicond.*, **25** (12), 1241 (1991).]
- [34] S. Sawyer, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur, N. Pala, Yu. Bilenko, J.P. Zhang, X. Hu, A. Lunev, J. Deng, R. Gaska. *J. Appl. Phys.*, **100**, 034504 (2006).
- [35] F.N. Hooge. *Physica*, **60**, 130 (1972).
- [36] Г.П. Жигальский. *УФН*, **173** (5), 465 (2003). [G.P. Zhigal'skii. *PHYS-USP*, **46** (5), 449 (2003).]
- [37] B. Šaulys, J. Matukas, V. Palenskis, S. Pralgauskaitė, G. Kuli-kauskas. *Acta Phys. Pol. A*, **119** (4), 514 (2011).
- [38] L. Wang, W. He, T. Zheng, Z. Chen, S. Zheng. *Superlattice Microst.*, **133**, 106188 (2019).
- [39] N. Liu, H. Gu, Y. Wei, S. Zheng. *Superlattice Microst.*, **141**, 106492 (2020).
- [40] X. Wang, H.-Q. Sun, Z.-Y. Guo. *Opt. Mater.*, **86**, 133 (2018).