

Деградация ультрафиолетовых светодиодов с квантовыми ямами InGaN/GaN, вызванная кратковременными воздействиями током

© А.М. Иванов, А.В. Клочков

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

Поступило в Редакцию 4 августа 2021 г.

В окончательной редакции 16 ноября 2021 г.

Принято к публикации 16 ноября 2021 г.

Проведен сравнительный анализ начальных стадий деградации ультрафиолетовых и синих светодиодных структур с квантовыми ямами InGaN/GaN. В режиме ускоренного старения структуры подверглись кратковременному последовательному воздействию токами 80–190 мА при прямом смещении. Время воздействия не превышало трех часов. Наблюдался рост (до 20%) внешней квантовой эффективности. Представлены наиболее вероятные физические механизмы, объясняющие изменения в InGaN/GaN-светодиодах и намечены возможные пути замедления старения ультрафиолетовых светодиодов.

Ключевые слова: деградация ультрафиолетовых светодиодов, возрастание квантовой эффективности, замедление старения.

DOI: 10.21883/JTF.2022.02.52019.229-21

Введение

Широкое использование полупроводниковых ультрафиолетовых (УФ) светодиодов и лазеров в различных отраслях приборостроения для задач оптоэлектроники, биологии, медицины и санитарии вызывает повышенный интерес исследователей к морфологии InGaN- и AlGaN-наноструктур и физическим процессам, происходящим в современных приборах на основе квантовых ям и квантовых точек.

Поскольку УФ светодиоды обладают меньшими коэффициентами полезного действия и сроком службы по сравнению со светодиодами видимого диапазона, исследование их процессов деградации представляет собой важную задачу в связи с возрастанием областей применения и ростом выпуска оптоэлектронных приборов этого диапазона излучения, особенно в области медицины, где деградация приборов наиболее нежелательна (медицинскому работнику затруднительно зрительно фиксировать изменения оптического излучения в УФ диапазоне). Это подтверждается современными исследованиями [1–6].

Рассмотрение причин деградации полупроводниковых наноструктур предполагает изучение аспектов изменения основных физических параметров светодиодов и лазеров на основе нитридных материалов: сравнение поведения приборов УФ и видимого диапазона, и в первую очередь — падения внешней квантовой эффективности. Понимание состава и природы возникающих дефектов необходимо для совершенствования технологии изготовления УФ GaN-светодиодов на основе квантовых ям в целях увеличения их надежности и срока службы. Несмотря на большое количество работ, в литературе

не сформировалось единого представления о природе старения и отказов светодиодов.

В более ранних работах механизмы деградации светодиодов, в частности, в случае воздействия прямым током объясняли ростом сопротивления контактов [7], миграцией ионов металлических примесей галлия и индия по системе протяженных дефектов одновременно с неоднородной генерацией дефектов [8], образованием туннельных проводящих каналов через активацию винтовых дислокаций [9] и катастрофическим отказам благодаря макроскопическим дефектам, избежать которых можно, оптимизируя процесс роста [10]. Современные представления связывают деградацию УФ светодиодов и лазеров с образованием центров безызлучательной рекомбинации в активных областях и барьерах, а также изменениями с легирующими примесями в *p*- и *n*-областях.

Конструктивные решения технологического дизайна структур позволяют улучшать реальные параметры приборов и способствовать увеличению их сроков службы, препятствуя процессам деградации. Нарастание активной площади *p*-контакта препятствует деградации за счет роста плотности тока, а увеличение количества квантовых ям регулирует распределения носителей в активной области и снижает оже-рекомбинацию [11].

Электроны в нитридных материалах имеют меньшую эффективную массу по сравнению с дырками и соответственно более высокую подвижность. Они легче проходят через череду квантовых ям и барьеров и накапливаются в последней квантовой яме у *p*-области. Движение дырок к *n*-области затруднено. Расчетным путем установлено, что увеличение ширины квантовой ямы и сокращение толщины барьеров понижает потенциальный барьер для дырок и увеличивает барьер для

утечки электронов, что ведет к возрастанию квантовой эффективности [12]. Флуктуации состава индия с ростом ширины квантовой ямы усиливает люминесценцию за счет роста потенциала локализации [13]. Целесообразно использование дополнительных слоев [14–16], сверхрешеток [17,18] и барьеров специальной формы [19,20], которые увеличивают перекрытие волновых функций электрона и дырки в квантовых ямах и, следовательно, скорости излучательной рекомбинации. Этому же способствует уменьшение квантово-размерного эффекта Штарка [13] и поляризационных полей [12,21,22].

Особенностью многих современных работ по конструктивному совершенствованию светодиодных структур с квантовыми ямами является расчетный характер. Улучшение характеристик приборов представляется на основе математического моделирования.

Целью настоящей работы являлся сравнительный анализ начальных стадий процессов старения в УФ и синих (описанный ранее в [23]) светодиодах на основе InGaN/GaN-квантовых ям. В качестве объектов в отличие от большинства исследовательских работ были выбраны индикаторные светодиоды, изготовленные по отработанной массовой промышленной технологии. Отличительными особенностями исследования являются режимы старения светодиодов: изменения в светодиодах происходили при кратковременных (не более трех часов) последовательных для образцов воздействиях постоянным током от 80 до 190 мА при прямом смещении. Примененные в этой работе токи многократно превосходили рабочие токи светодиодов и приводили к одновременному разогреву исследуемых структур. Была продемонстрирована работоспособность этих приборов в условиях сильных перегрузок по сравнению с рабочими режимами. Максимальный рост внешней квантовой эффективности на начальных стадиях токового воздействия составлял 20%. При последующих тестах большими токами положительные изменения сменялись деградационными процессами. Были представлены предполагаемые механизмы начального улучшения характеристик УФ светодиодов и намечены возможные технологические пути замедления процессов их старения, не связанные с конструктивными изменениями.

1. Описание эксперимента

Измерения вольт-амперных и световых характеристик УФ светодиодов с InGaN/GaN-квантовыми ямами выполнялись с помощью цифрового вольтметра Keysight (Agilent) 34401A и источника питания GPS-4303. Токи в измерениях токовых зависимостей устанавливались с помощью магазина сопротивлений P33. Специально разработанная капсула позволяла жестко связывать на фиксированном расстоянии измеряемые промышленно изготовленные индикаторные светодиоды одинаковой геометрии с измерительным фотодиодом. Примененная схема и чувствительность приборов позволяли измерять

наноамперные токи. Для контроля температуры корпуса светодиода применялся термистор NXFT15WF. Кремниевый фотодиод ФД-24К использовался для измерения только относительных изменений интенсивности излучения и внешней квантовой эффективности η .

Для исследования были взяты InGaN/Ga-светодиоды фирмы Betlux — BL-L522VC с пиковой энергией излучения $h\nu_{QW} = 3.06$ eV или длиной волны излучения $\lambda = 405$ nm и фирмы Nichia — NSPU510CS, $h\nu_{QW} = 3.31$ eV, $\lambda = 375$ nm, $\eta \leq 30\%$, а также NSPB300, $h\nu_{QW} = 2.67$ eV, $\lambda = 465$ nm, $\eta = 15\%$; основные результаты представлены в [23] с номинальными токами $J = 20$ mA и реальной площадью диодов $\sim 10^{-3}$ cm².

Для анализа процессов деградации УФ светодиодов было предложено испытывать приборы короткими по времени воздействиями с пропуском токов (в диапазоне $J = 80$ – 190 mA) при прямом смещении. Продолжительность каждого теста составляла от 10 min до 3 h. После каждой последовательной стадии электрического воздействия на светодиод изучались изменения вольт-амперных и токовых (оптической мощности и внешней квантовой эффективности) зависимостей.

Для удобства изложения и восприятия материала обозначим УФ светодиоды BL-L522VC, NSPU510CS и синие NSPB300 как светодиоды X, Y и Z соответственно.

2. Результаты эксперимента

На рис. 1 представлены изменения внешней квантовой эффективности в результате тестов по ускоренной деградации при воздействии током при прямом смещении для светодиодов X и Y от количества электричества, прошедшего через прибор.

После теста № 1 (80 mA, ~ 1 h) наблюдается быстрый рост квантовой эффективности светодиодов X и Y, составляющий $\sim 20\%$, и совсем незначительные изме-

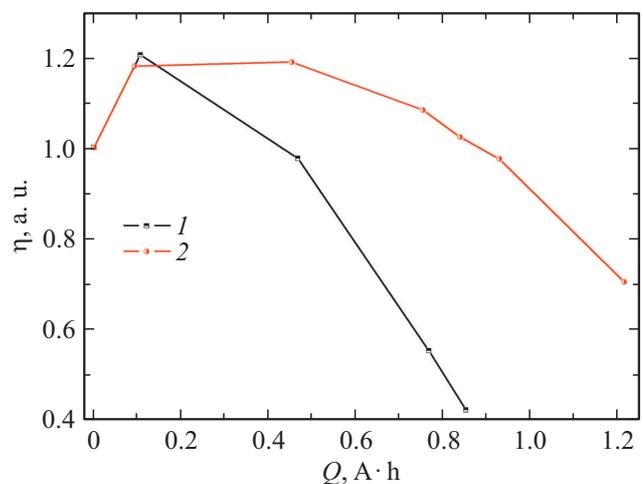


Рис. 1. Зависимости внешней квантовой эффективности от количества электричества, прошедшего через светодиоды: 1, 2 — светодиоды X, Y соответственно.

Таблица 1. Последовательное тестирование светодиодов X и Y при прямом смещении

Тест №	Прямой ток J , mA	Мощность W , W	Время t , h	η/η_{init} при $J=9$ mA, %
Светодиод X				
1	80	0.294	1.33	120
2	120	0.466	3	98
3	150	0.615	2	55
4	170	0.726	0.5	42
Светодиод Y				
1	80	0.285	1.17	118
2	120	0.445	3	119
3	150	0.569	2	108
4	170	0.656	0.5	107
5	180	0.700	0.5	97
6	190	0.739	1.5	70

Таблица 2. Последовательное тестирование светодиодов Z при прямом смещении

Тест №	Прямой ток J , mA	Мощность W , W	ΔT , °C	Время t , h	η/η_{init} при $J = 20$ mA, %
Светодиод Z					
1	150	0.585	105	1	92
2	150	0.585	105	1	120
3	150	0.585	105	0.5	121

Примечание. ΔT — минимальный перегрев активной области.

нения после теста № 2 (120 mA/(3 h), диод Y). В последующем уменьшение квантовой эффективности наиболее резко происходит при тестах № 3 — 150 mA/(2 h) и № 4 — 170 mA/(0.5 h) для светодиода X, а для светодиода Y — при тестах № 5 — 180 mA/(0.5 h), № 6 — 190 mA/(1.5 h). Спад квантовой эффективности в светодиодах X наблюдается при воздействиях меньшими токами, чем в светодиодах Y. Данные по УФ светодиодам представлены в табл. 1 (η_{init} — внешняя квантовая эффективность исходного образца). Поведение УФ светодиодов отличается от светодиодов Z прежде всего быстротечностью наблюдаемых изменений: после первого воздействия 150 mA/(1 h) (150 A/cm², 1 h) эффективность Z не изменилась, после второго воздействия 150 mA/(1 h) она упала на 18%, после третьего 150 mA/(0.5 h) внешняя квантовая эффективность выросла на 14% по сравнению с исходной. Предварительные воздействия токами 80–120 mA не изменяли эффективность. Потребовалось

$Q = 0.75 \text{ A} \cdot \text{h}$, чтобы проявились изменения внешней квантовой эффективности. В табл. 2 представлен другой режим старения диода Z.

На рис. 2 приведены зависимости интенсивности излучения (фототока J_{ph}) от тока через светодиод Y до и после тестов № 1, 2, 6. Наиболее существенные различия в зависимостях проявляются при $J < 50 \mu\text{A}$ с резким нарастанием $J_{ph} \propto J^3$. При этих токах оптическая мощность после теста № 2 меньше, чем после теста № 1, а при $J < 7 \mu\text{A}$ — меньше исходной. На начальном участке зависимости падение интенсивности излучения после теста № 6 наиболее существенное (различие на порядок с исходной зависимостью).

На рис. 3 представлены токовые зависимости внешней квантовой эффективности до и после тестов № 1–4 диода X. Исходный образец в двух последовательных измерениях имеет более высокий пороговый ток J_{th} , соответствующий появлению излучения светодиода. При $J < 100 \mu\text{A}$ исходный образец обладает меньшей эффективностью по сравнению с образцами, подвергнутыми электрическим стрессам токами при прямом смещении, что характерно для образцов X, Y (рис. 3, вставка) и не связано с утечками между контактами. Падение эффективности по сравнению с исходной после тестов № 2–4 происходит не во всем диапазоне токов. Для зависимостей эффективности от тока характерно присутствие слабо выраженного максимума при $J = 9 \text{ mA}$ и пологий спад эффективности при больших токах в отличие от диода Y, в котором наблюдалось плато при средних и номинальных токах.

На рис. 4 показаны зависимости тока от напряжения до и после тестов № 1–4 диода X. Исходные зависимости менялись при двух последовательных измерениях. Они имели пологую часть при $U = 2.5 \text{ V}$, не характерную для InGaN-светодиодов в измерениях при прямом смещении. При малых напряжениях ток существенно

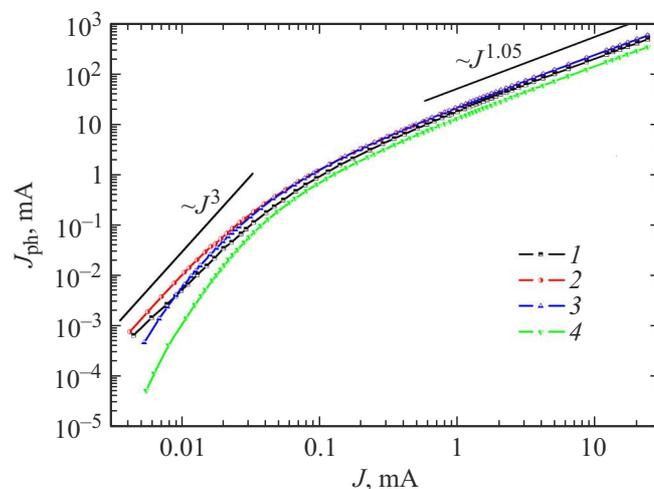


Рис. 2. Зависимость фототока от тока при прямом смещении светодиода Y до (1) и после трех воздействий током (2–4): 2 — 80 mA/(1.17 h), 3 — 120 mA/(3 h), 4 — 190 mA/(1.5 h).

изменялся после каждого теста, однако при средних и высоких напряжениях различия вольт-амперных зависимостей незначительные. Для определения фактора идеальности $n_J(U_J)$ из вольт-амперных характеристик (рис. 4) рассчитывались зависимости тока от напряжения на $p-n$ -переходе $J(U_J)$. Из линейной области $J(U)$ характеристики определялось r_s — последовательное сопротивление, которое составило 10.8Ω , $U_J = U - Jr_s$. Зависимости $J(U_J)$ аппроксимируются экспоненциальной функцией $J(U_J) \propto \exp(qU_J/n_J(U_J)kT)$, q — элемен-

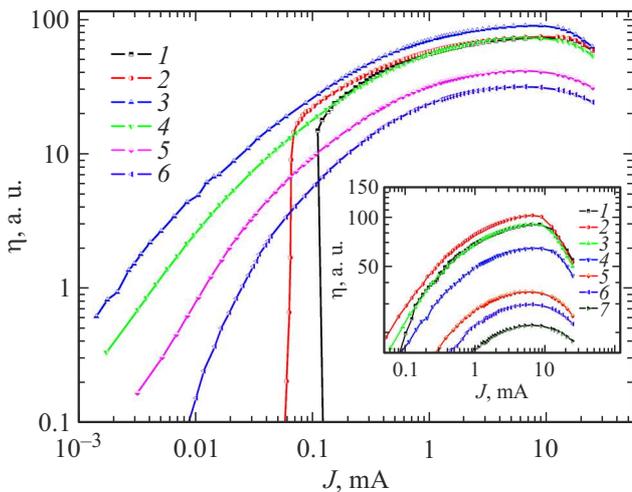


Рис. 3. Зависимости внешней квантовой эффективности от тока при прямом смещении светодиода X до (1,2) и после четырех последовательных воздействий током (3–6): 3 — 80 мА/(1.33 ч), 4 — 120 мА/(3 ч), 5 — 150 мА/(2 ч), 6 — 170 мА/(0.5 ч). На вставке — до (1) и после шести последовательных воздействий током (2–7): 2 — 80 мА/(1.17 ч), 3 — 105 мА/(3 ч), 4 — 120 мА/(3 ч), 5 — 150 мА/(2.5 ч), 6 — 160 мА/(0.5 ч), 7 — 170 мА/(0.5 ч).

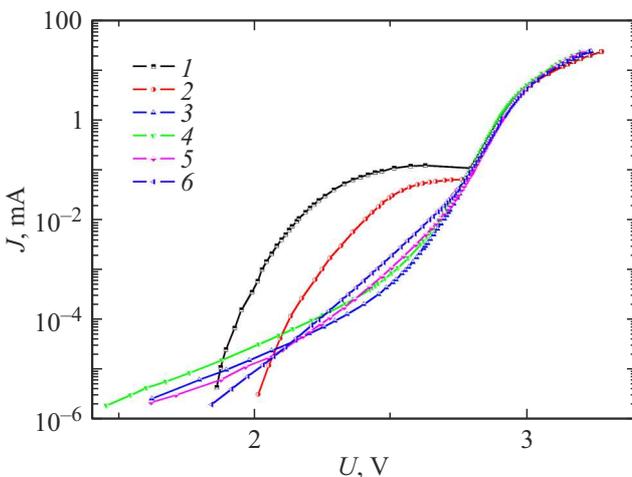


Рис. 4. Зависимости тока от напряжения $J(U)$ светодиода X до (1,2) и после четырех последовательных воздействий током (3–6): 3 — 80 мА/(1.33 ч), 4 — 120 мА/(3 ч), 5 — 150 мА/(2 ч), 6 — 170 мА/(0.5 ч).

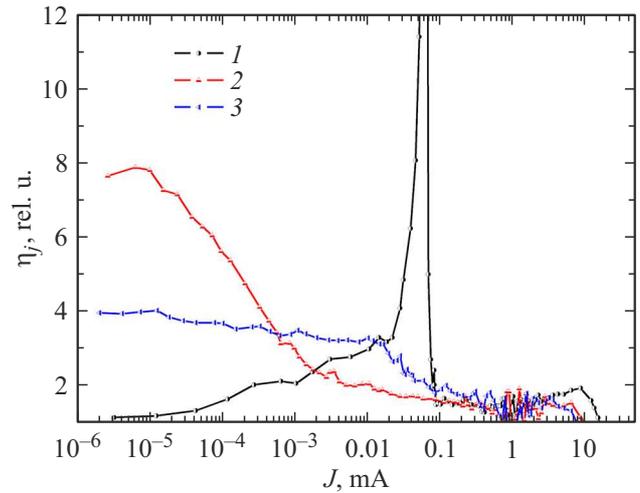


Рис. 5. Зависимости фактора идеальности от тока светодиода X до (1) и после двух воздействий током (2,3): 2 — 80 мА/(1.33 ч), 3 — 170 мА/(0.5 ч).

тарный заряд, kT — тепловая энергия. На их основе рассчитывались зависимости $n_J(J) = (q/kT)/(d \ln J/dU_J)$.

Рис. 5 представляет графики фактора идеальности от тока $n_J(J)$ до и после тестов № 1, 4 диода X. В исходном образце наблюдается аномальным рост n_J , связанный с полочкой на вольт-амперной зависимости. Величина $n_J(J)$ составляла ≥ 3 для $J < 1 \mu\text{A}$ в образце, подвергнутом последовательным токовым стрессам. В области рабочих токов на всех зависимостях наблюдается падение $n_J(J) \leq 2$.

3. Обсуждение результатов

Производители заявляют о длительных сроках службы полупроводниковых светодиодов — десятки тысяч часов. Эти данные получают экстраполяцией результатов наблюдения старения светодиодов в экстремальных условиях (повышенные ток и температура кристалла). Фирма CREE, например, использует стандарт JESD22: максимально допустимый ток в течение 1008 ч. Согласно JESD22, снижение светового потока на 15% означает, что прибор вышел из строя. Нестандартное поведение светодиодов, например рост оптического излучения на начальной стадии старения, как продемонстрировано в наших исследованиях, может повлиять на точность оценки сроков службы.

Из рис. 1 и табл. 1 видно, что после тестов № 1 наблюдался рост внешней квантовой эффективности УФ светодиодов $\sim 20\%$ с последующим ее падением после тестов № 3–6. Сравнивая наши результаты с исследованиями по долговременной деградации светодиодов, можно отметить две особенности наблюдаемых результатов:

а) в экспериментах не наблюдается роста оптической энергии излучения при старении повышенными токами [24,25];

б) рост наблюдается, но он весьма незначителен по сравнению с наблюдаемым нами — на уровне нескольких процентов $\leq 5\%$ (5% только в части исследованных в работе светодиодов [8]) и авторы или не обращают на него внимание читателей [7,26], по нашему мнению, возможно, относя его к погрешностям измерений [27], или в отличие от наших вольт-амперных зависимостей рост сопровождается увеличением напряжения благодаря деградации омического контакта [7,28].

В деградации УФ и синих светодиодов на основе InGaN/GaN-квантовых ям проявляются различные механизмы. Водород может формировать электрически нейтральный комплекс Mg–H и вместе с H^+ накапливаться в *p*-слоях и в активной области. Mg–H разрушается из-за воздействия горячих носителей, джоулева нагрева и обратного поглощения излучения. H мигрируют путем диффузии и дрейфа в электрическом поле в направлении *n*-стороны. Благодаря накоплению акцепторных дефектов в процессе эксплуатации рядом с или в активном районе происходит частичная компенсация *n*-легирования, образуются центры безызлучательной рекомбинации, вероятен паразитный ток [1,2].

На начальных этапах возможны положительные изменения — рост оптической мощности, уменьшение рабочего напряжения, наблюдаемые не во всех экспериментах по старению светодиодов. Это связано с конкуренцией процессов, изменяющих скорости излучательной и безызлучательной рекомбинации. Рост концентрации носителей (активация Mg, развал дефекта Mg–H, рост концентрации дырок, подробнее — в [23]) усиливает излучательную рекомбинацию. Одновременно идет процесс дефектообразования. Возникновение дефектов, их движение и отжиг могут происходить за счет энергии, выделяемой вблизи дефекта при рекомбинации (энергия близка ширине запрещенной зоны) [29]. Каждый акт рекомбинации Шокли–Рида–Холла (Shockley–Read–Hall, SRH) и оже-рекомбинации высвобождает энергию, которой может быть достаточно для разрыва связей дефект–примесь в GaN, способствуя тем самым генерации дефектов в квантовых ямах [24].

Увеличивается концентрация в основном точечных дефектов, участвующих в безызлучательной SRH-рекомбинации; в туннельном транспорте носителей в квантовые ямы. Спектр глубоких уровней в запрещенной зоне InGaN/GaN-квантовых структур изменяется под стрессовым воздействием. Увеличение доли более глубоких центров усиливают падение эффективности [25,30]. Напротив, образование более мелких транспортных уровней, обеспечивающих туннелирование по дефектам, способствует ее росту [31], так как помогает носителям преодолевать потенциальные барьеры. В результате этих процессов происходит рост интенсивности

излучения после тестов № 1,2 (рис. 2) в нашем исследовании. При жестких тестированиях большими токами происходит локальный нагрев дефектов фононами, который приводит к изменению скорости безызлучательной рекомбинации [29]. Определяющим процессом становится возникновение глубоких центров, ответственных за безызлучательную рекомбинацию: эффективность светодиодов падает (рис. 1, 3).

Полный ток в квантовую яму разделяется на ток, определяющий излучательную рекомбинацию и ток, сопряженный с безызлучательной рекомбинацией и потерями. Общепринятым положением при рассмотрении процессов рекомбинации в InGaN/GaN-квантовых ямах является модель ABC (например, [32]) для внутренней квантовой эффективности:

$$\eta_{\text{int}} = \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3},$$

где *n* — концентрация носителей, *A*, *B*, *C* — коэффициенты рекомбинации безызлучательной, излучательной и оже. Согласно [33,34], в знаменатель должно быть добавлено слагаемое *f*(*n*), связанное с током утечки носителей заряда из квантовых ям. При высоком уровне инжекции поляризационные поля и увеличение дефектности барьеров, прилегающих к активным областям, вызывают отток носителей из квантовых ям [35]. Доминирующим механизмом рекомбинации становится оже-рекомбинация [32]. При токовом стрессовом воздействии 80 А/см² (соответствует плотности тока теста № 1 нашего исследования) оже-рекомбинация составляет 66% от общей рекомбинации, а SRH — всего 1.4% [24].

При невысоких уровнях инжекции обычно рассматривают две составляющие рекомбинации [36]:

$$\frac{I}{q} \eta_i = V(An + Bn^2),$$

где *I* — плотность тока, η_i — эффективность инжекции носителей, *V* — объем активной области. $A \propto N\sigma v_{th}$, т.е. пропорционален плотности дефектов, сечению захвата носителей, тепловой скорости, в предположении их равенства для обоих типов носителей [37]. В условиях ускоренного старения величина *A*, связанная со скоростью безызлучательной рекомбинации, не является неизменной величиной, а зависит от изменений в спектре дефектов. Рост концентрации дефектов (особенно с наиболее глубокими уровнями) и возможный рост сечений захвата носителей увеличивает величину *A* и является основным механизмом деградации УФ светодиодов.

На рис. 2 зависимость $J_{ph} \propto J^3$ с ростом тока сменяется более плавной — $J_{ph} \propto J^{1.05}$. Точка перегиба примерно соответствует точке перехода на более плавную зависимость от тока скорости излучательной рекомбинации в расчетах согласно ABC-модели [24]. В диапазоне низких токов эффективность лимитируется SRH-потерями.

Из рис. 3 видно, что J_{th} возрастает при последовательных тестах № 2–4. Увеличение порогового тока J_{th} обусловлено движением точечных дефектов в сторону активной области [38]. $J_{th} \propto n_{th}/\tau$, n_{th} — пороговая плотность носителей, τ — рекомбинационное время жизни. Последнее определяется коэффициентами рекомбинации A, B, C . Увеличение J_{th} коррелирует с возрастанием величины A , и никаких изменений B и C не ожидается после токовых стрессов [39]. В исходном образце до воздействия $J_{th} \sim 100 \mu\text{A}$ и уменьшается на два порядка ($J_{th} \sim 1 \mu\text{A}$) после токового воздействия (тест № 1, 80 mA, ~ 1 h), сопровождающегося ростом внешней квантовой эффективности. Соответствующие изменения в спектре дефектов влекут за собой падение величины A и скорости безызлучательной рекомбинации.

На рис. 4 вольт-амперной зависимости диода X можно выделить несколько участков с разными наклонами. При $U \leq 2.8$ V ток заметно меняется после тестов № 1–4. В диодах X не наблюдается монотонного смещения зависимостей в область меньших напряжений, как происходило в диодах Y. Возрастание тока при постоянном смещении объясняется изменениями спектра дефектов и увеличением уровней, участвующих в туннельном транспорте носителей (trap-assisted tunneling (TAT), hopping) в активную область [3,5,38,40,41]. При воздействиях токами 150 и 170 mA зависимости смещаются в область больших напряжений. Наличие для исходного образца плоских участков зависимости при $U \approx 2.5$ V проявляется в аномальном скачке величины фактора идеальности (рис. 5).

На промежуточном участке при $2.9 \geq U \geq 2.8$ V возрастает крутизна зависимости тока, что может быть связано с ростом инжекции и туннельной прозрачности барьеров. $n_J(J) \leq 2$, а рост эффективности замедляется (рис. 3). Изменения $J(U)$ после токовых воздействий не проявляются.

На участке токов $J \geq 1.0$ mA инжекционный ток преобладает. Эффективность достигает максимума и начинает плавно спадать, что соответствует усилению безызлучательной рекомбинации; $n_J(J)$ устремляется к единице.

На рис. 5 видно, что при токах $J < 1 \mu\text{A}$ величина $n_J(J) \geq 3$ после тестов № 1, 4. Такие большие величины фактора идеальности соответствуют наличию прыжкового туннелирования носителей по дефектам [42]. Отмеченное увеличение величины $n_J(J)$ по сравнению с исходным образцом в результате токовых стрессов указывает на рост концентрации глубоких уровней, способствующих преодолению носителями потенциальных барьеров на основе проводимости по ловушкам [25].

Зафиксированные эффекты увеличения оптической мощности, внешней квантовой эффективности при стрессовых воздействиях током при прямом смещении, сопровождающихся джоулевым нагревом ($\Delta T \sim 100^\circ\text{C}$ [23]), в промышленных InGaN-светодиодах говорят, по мнению авторов, о возможном улучшении при изготовлении их исходных характеристик

(например, путем более высокой активацией Mg). Диоды X, Y и Z демонстрируют различную „стойкость“ к токовому воздействию, так как падение эффективности в них происходит при различных превышениях номинального тока (20 mA).

Наблюдаемое ранее увеличение квантовой эффективности при длительных воздействиях током [43] предполагает два направления продления срока службы и улучшения характеристик InGaN- и AlGaN-оптоэлектронных приборов с квантовыми ямами. Конструктивные решения, описанные в обзорной части, в основном основаны на особенностях роста и комбинирования эпитаксиальных слоев.

Другим путем повышения эффективности и противодействия деградации представляется увеличение инжекции. Главным легирующим элементом для p -области является Mg. Роста концентрации дырок в p -области видимо можно добиваться наращиванием концентрации Mg, увеличением его активации электрическим током [5], развалом дефекта Mg–H, выращиванием r -слоев не в потоке водорода, а в потоке азота. Последнее требует дополнительных исследований так как деградация внешней квантовой эффективности и генерационно-рекомбинационный шум в исследованных УФ светодиодах связаны с электронной ловушкой E_c — 0.8 eV [44]. Дефекты, располагающиеся в InGaN/GaN-квантовых ямах, обусловлены межзельным азотом, и возрастание его концентрации может ускорить деградацию УФ светодиодов. Также и в [24] происхождение безызлучательных дефектов может быть связано с азотом.

Рост легирования Mg ограничен самокомпенсацией примеси Mg [45,46]; образованием дефектов донорного типа на основе Mg ($\text{Mg}_i - \text{V}_N$, $\text{Mg}_{\text{Ga}} - \text{V}_N$). Выбор оптимальных условий легирования и режима отжига важен для синтеза эпитаксиальных слоев p -GaN с низким сопротивлением [47].

4. Выводы

1) Сравнение процессов деградации в синих светодиодах (рис. 1, табл. 1, 2) показало, что для начальных изменений в синих диодах нужны большие токи по сравнению с номинальными, чем в УФ. При этом максимальный рост η для рассматриваемых как УФ, так и синих светодиодов составлял $\sim 20\%$. Из двух видов УФ светодиодов процесс деградации раньше начинается в светодиодах X. Различия в поведении светодиодов Z и УФ X, Y, вероятно, связаны с различной шириной запрещенной зоны и соответственно энергией, которая выделяется при безызлучательной рекомбинации. Это приводит к различиям в изменениях спектра дефектов, а именно его изменения определяют процессы старения светодиодов.

2) Наблюдаемое нами увеличение внешней квантовой эффективности должно учитываться разработчика-

ми приборов при оценке сроков службы изготавливаемых светодиодов. Дополнительные исследования по долговременной деградации могут показать, возрастают ли сроки службы светодиодов после кратковременного токового стрессового воздействия, сопровождающегося ростом внешней квантовой эффективности.

Заключение

Проведенный сравнительный анализ промышленно изготовленных индикаторных УФ и синих светодиодов с применением набора чрезвычайно коротких (≤ 3 h), последовательных воздействий токами (в широком диапазоне 80–190 mA) при прямом смещении показал возможность улучшения их характеристик. Изменения в УФ светодиодах начинаются при меньших токовых нагрузках по сравнению с синими. Предложенный способ воздействия позволил наблюдать в УФ и синих светодиодах рост интенсивности излучения и внешней квантовой эффективности (до 20%), не связанные с долговременными процессами. Изменения в спектре дефектов с увеличением уровней, обеспечивающих туннелирование по дефектам, обуславливают улучшение проводимости при движении носителей в квантовую яму. Последующие воздействия большими токами приводили к росту концентрации SRH-центров и падению квантовой эффективности. Замедление процессов старения и улучшение характеристик в светодиодных структурах с квантовыми ямами на основе нитридных материалов может достигаться, по мнению авторов, за счет лучшей активации Mg и воздействием на спектр дефектов с целью улучшения транспорта носителей. Возможность с той же целью выращивания *p*-слоев в потоке азота, а не водорода требует дополнительных исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Glaab, J. Haefke, J. Ruschel, M. Brendel, J. Rass, T. Kolbe, A. Knauer, M. Weyers, S. Einfeldt, M. Guttman, C. Kuhn, J. Enslin, T. Wernicke, M. Kneissl. *J. Appl. Phys.*, **123**, 104502 (2018). DOI: 10.1063/1.5012608
- [2] 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). DOI: 10.1109/LPT.2019.2900156
- [3] H. Xiu, Y. Zhang, J. Fu, Z. Ma, L. Zhao, J. Feng. *Curr. Appl. Phys.*, **19**, 20 (2019). DOI: 10.1016/j.cap.2018.10.019
- [4] Z. Ma, A. Almalki, X. Yang, X. Wu, X. Xi, J. Li, S. Lin, X. Li, S. Alotaibi, M. Al huwayz, M. Henini, L. Zhao. *J. Alloys Compd.*, **845**, 156177 (2020). DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.156177
- [5] Z. Ma, H. Cao, S. Lin, X. Li, L. Zhao. *Solid State Electron.*, **156**, 92 (2019). DOI: 10.1016/j.sse.2019.01.004
- [6] 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). DOI: 10.1109/TED.2016.2631720
- [7] M. Meneghini, D. Barbisan, Y. Bilenko, M. Shatalov, J. Yang, R. Gaska, G. Meneghesso, E. Zanoni. *Microelectron. Reliab.*, **50**, 1538 (2010). DOI: 10.1016/j.microrel.2010.07.089
- [8] А.Л. Закгейм, М.Е. Левинштейн, В.П. Петров, А.Е. Черныakov, Е.И. Шабунина, Н.М. Шмидт. *ФТП*, **46** (2), 219 (2012). [A.L. Zakheim, M.E. Levinshtein, V.P. Petrov, A.E. Chernyakov, E.I. Shabunina, N.M. Shmidt. *Semicond.*, **46** (2), 208 (2012). DOI: 10.1134/S106378261202025X
- [9] A. Pinos, S. Marcinkevičius, M.S. Shur. *J. Appl. Phys.*, **109**, 103108 (2011). DOI: 10.1063/1.3590149
- [10] Z. Gong, M. Gaevski, V. Adivarahan, W. Sun, M. Shatalov, M. Asif Khan. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 121106 (2006). DOI: 10.1063/1.2187429
- [11] J. Ruschel, J. Glaab, B. Beidoun, N.L. Ploch, J. Rass, T. Kolbe, A. Knauer, M. Weyers, S. Einfeldt, M. Kneissl. *Photonics Res.*, **7** (7), B36 (2019). DOI: 10.1364/PRJ.7.000B36
- [12] H. Dong, T. Jia, J. Liang, A. Zhang, Z. Jia, W. Jia, X. Liu, G. Li, Y. Wu, B. Xu. *Opt. Laser Technol.*, **129**, 106309 (2020). DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106309
- [13] J. Huang, W. Liu, L. Yi, M. Zhou, D. Zhao, D. Jiang. *Superlattices Microstruct.*, **113**, 534 (2018). DOI: 10.1016/j.spmi.2017.11.036
- [14] L. Wang, W. He, T. Zheng, Z. Chen, S. Zheng. *Superlattices Microstruct.*, **133**, 106188 (2019). DOI: 10.1016/j.spmi.2019.106188
- [15] M.R. Kwon, T.H. Park, T.H. Lee, B.R. Lee, T.G. Kim. *Superlattices Microstruct.*, **116**, 215 (2018). DOI: 10.1016/j.spmi.2018.02.033
- [16] N. Liu, H. Gu, Y. Wei, S. Zheng. *Superlattices Microstruct.*, **141**, 106492 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106492>
- [17] X. Wang, H.-Q. Sun, Z.-Y. Guo. *Opt. Mater.*, **86**, 133 (2018). DOI: 10.1016/j.optmat.2018.09.037
- [18] R.K. Mondal, V. Chatterjee, S. Pal. *Opt. Mater.*, **104**, 109846 (2020). DOI: /10.1016/j.optmat.2020.109846
- [19] W. Guo, F. Xu, Y. Sun, L. Lu, Z. Qin, T. Yu, X. Wang, B. Shen. *Superlattices Microstruct.*, **100**, 941 (2016). <http://dx.doi.org/10.1016/j.spmi.2016.10.070>
- [20] Q. Wang, L. He, L. Wang, C. Li, C. He, D. Xiong, D. Lin, J. Wang, N. Liu, Z. Chen, M. He. *Opt. Commun.*, **478**, 126380 (2021). DOI: 10.1016/j.optcom.2020.126380
- [21] Y. Zhang, L. Yu, K. Li, H. Pi, J. Diao, X. Wang, Y. Shen, C. Zhang, W. Hu, W. Song, S. Li. *Superlattices Microstruct.*, **82**, 151 (2015). DOI: 10.1016/j.spmi.2015.02.004
- [22] L. Wang, G. Li, W. Song, H. Wang, X. Luo, Y. Sun, B. Zhang, J. Jiang, S. Li. *Superlattices Microstruct.*, **122**, 608 (2018). DOI: 10.1016/j.spmi.2018.06.039
- [23] А.М. Иванов. *ЖТФ*, **91** (1), 76 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.01.50276.447-18 [A.M. Ivanov. *Tech. Phys.*, **66** (1), 71 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221010114]
- [24] N. Renso, C. De Santi, A. Caria, F. Dalla Torre, L. Zecchin, G. Meneghesso, E. Zanoni, M. Meneghini. *J. Appl. Phys.*, **127**, 185701 (2020). DOI: 10.1063/1.5135633
- [25] F. Piva, C. De Santi, M. Deki, M. Kushimoto, H. Amano, H. Tomozawa, N. Shibata, G. Meneghesso, E. Zanoni, M. Meneghini. *Microelectron. Reliab.*, **100–101**, 113418 (2019). DOI: 10.1016/j.microrel.2019.113418

- [26] T. Yu, S. Shang, Z. Chen, Z. Qin, L. Lin, Z. Yang, G. Zhang. *J. Lumin.*, **122–123**, 696 (2007). DOI: 10.1016/j.jlumin.2006.01.263
- [27] M. Buffolo, C. De Santi, M. Meneghini, D. Rigon, G. Meneghesso, E. Zanoni. *Microelectron. Reliab.*, **55**, 1754 (2015). <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2015.06.098>
- [28] J. Fu, L. Zhao, H. Cao, X. Sun, B. Sun, J. Wang, J. Li. *AIP Adv.* **6**, 055219 (2016). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4953056>
- [29] I.N. Yassievich. *Semicond. Sci. Technol.* **9**, 1433 (1994).
- [30] M. La Grassa, M. Meneghini, C. De Santi, E. Zanoni, G. Meneghesso. *Microelectron. Reliab.*, **64**, 614 (2016). DOI: 10.1016/j.microrel.2016.07.131
- [31] Н.И. Бочкарева, А.М. Иванов, А.В. Клочков, В.А. Тарала, Ю.Г. Шретер. *Письма в ЖТФ*, **42**(22), 1 (2016). DOI: 10.21883/pjtf.2016.22.43932.16303 [N.I. Bochkareva, A.M. Ivanov, A.V. Klochkov, V.A. Tarala, Y.G. Shreter. *Tech. Phys. Lett.*, **42**(11), 1099 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016110146]
- [32] S.Yu. Karpov. *Opt. Quantum Electron.* **47**, 1293 (2015). DOI: 10.1007/s11082-014-0042-9
- [33] Q. Lv, J. Gao, X. Tao, J. Zhang, C. Mo, X. Wang, C. Zheng, J. Liu. *J. Lumin.*, **222**, 117186 (2020). DOI: 10.1016/j.jlumin.2020.117186
- [34] P. Sahare, B.K. Sahoo. *Mater. Today: Proceedings*, **28**, 74 (2020). DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.303
- [35] N. Trivellin, D. Montia, C. De Santia, M. Buffolo, G. Meneghesso, E. Zanonia, M. Meneghinia. *Microelectron. Reliab.*, **88–90**, 868 (2018). DOI: 10.1016/j.microrel.2018.07.145
- [36] 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). DOI: 10.1109/LED.2009.2014570
- [37] J. Hu, L. Yang, M.W. Shin. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 035107 (2008). <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/41/3/035107>
- [38] D. Monti, M. Meneghini, C. De Santi, G. Meneghesso, E. Zanoni, A. Bojarska, P. Perlin. *Microelectron. Reliab.*, **76–77**, 584 (2017). DOI: 10.1016/j.microrel.2017.06.043
- [39] M. Meneghini, G. Meneghesso, N. Trivellin, E. Zanoni, K. Orita, M. Yuri, D. Ueda. *IEEE Electron Device Lett.*, **29**(6), 578 (2008). DOI: 10.1109/LED.2008.921098
- [40] Н.И. Бочкарева, Ю.Г. Шретер. *ФТП*, **52**(7), 796 (2018). DOI: 10.21883/FTP.2018.07.46055.8790 [N.I. Bochkareva, Y.G. Shreter. *Semicond.*, **52**(7), 934 (2018). DOI: 10.1134/S1063782618070035]
- [41] N.I. Bochkareva, A.M. Ivanov, A.V. Klochkov, Y.G. Shreter. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1697**, 012203 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012203
- [42] D. Zhu, J. Xu, A. Noemaun, J. Kim, E. Schubert, M. Crawford, D. Koleske. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 081113 (2009). DOI: 10.1063/1.3089687
- [43] M. Osinski, D.L. Barton. In coll.: *Introduction to Nitride Semiconductor Blue Lasers and Light Emitting Diodes*, ed. by S. Nakamura, S.F. Chichibu. (CRC Press, 2000), p. 386. ISBN 9780748408368
- [44] I-H. Lee, A.Y. Polyakov, S-M. Hwang, N.M. Shmidt, E.I. Shabunina, N.A. Tal'nishnih, N.B. Smirnov, I.V. Shchemerov, R.A. Zinovyev, S.A. Tarelkin, S.J. Pearton. *Appl. Phys. Lett.*, **111**, 062103 (2017). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4985190>
- [45] H.R. Qi, S. Zhang, S.T. Liu, F. Liang, L.K. Yi, J.L. Huang, M. Zhou, Z.W. He, D.G. Zhao, D.S. Jiang. *Superlattices Microstruct.*, **133**, 106177 (2019). DOI: 10.1016/j.spmi.2019.106177
- [46] Q. Xu, S. Zhang, B. Liu, T. Tao, Z. Xie, X. Xiu, D. Chen, P. Chen, P. Ha, Y. Zheng, R. Zhang. *Superlattices Microstruct.*, **119**, 150 (2018). DOI: 10.1016/j.spmi.2018.04.053
- [47] A.V. Mazalov, D.R. Sabitov, V.A. Kureshov, A.A. Padalitsa, A.A. Marmalyuk, R.Kh. Akchurin. *Mod. Electron. Mater.*, **2**, 45 (2016). <http://dx.doi.org/10.1016/j.moem.2016.09.003>