

## Деградация структур на основе InGaN/GaN под действием $\gamma$ -облучения

Л. Н. Вострецова<sup>1</sup>, М. Ю. Махмуд-Ахунов<sup>2</sup>, А. А. Чулакова<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

<sup>1</sup>Kapiton04@yandex.ru, <sup>2</sup>maratmau@mail.ru, <sup>3</sup>tchulakowa@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В настоящее время гетероструктуры GaN/InGaN являются основной элементной базой современной оптоэлектроники. Широкое распространение структур на основе InGaN обуславливает высокие требования к надежности. Для обеспечения высокой надежности гетероструктур необходимо понимание механизмов излучательной и безызлучательной рекомбинации, механизмов деградации в данных материалах, а следовательно, и понимание природы внутренних дефектов, оказывающих влияние на электрические и оптические характеристики светодиодов. Значительное место отводится изучению радиационной стойкости гетероструктур на основе InGaN/GaN, что связано с возможностью вскрывать природу существующих в исследуемых образцах дефектов, исследовать влияние обнаруженных дефектов на эффективность светодиодных структур. Целью данной работы является исследование влияния  $\gamma$ -излучения на электрические характеристики светодиодных структур на основе InGaN/GaN (длина волны при комнатной температуре 470 нм). Для достижения поставленной цели проводилось измерение прямых и обратных вольт-амперных характеристик на автоматизированной измерительной установке в диапазоне доз  $\gamma$ -излучения 0–0,4 МРад. Для объяснения обнаруженных изменений на вольт-амперных характеристиках использовались методы рекомбинационной спектроскопии и нестационарной спектроскопии глубоких уровней. *Результаты.* Установлено, что основным механизмом токопереноса в диапазоне напряжений до 2,5 В для исследуемых структур является туннелирование. В этом же диапазоне напряжений наблюдается зависимость величины прямого и обратного тока от дозы  $\gamma$ -излучения: при 0,2 МРад наблюдается уменьшение тока относительно необлученного образца, при 0,4 МРад – увеличение тока относительно необлученного образца. Методами рекомбинационной спектроскопии и нестационарной спектроскопии глубоких уровней обнаружен уровень с энергией  $0,60 \pm 0,02$  эВ, участвующий в создании туннельного потока. *Выводы.* С помощью обобщенной модели рекомбинации показано, что величина туннельного тока зависит от концентрации глубоких центров, создающих энергетические уровни в запрещенной зоне. Методом рекомбинационной спектроскопии (по зависимости  $\frac{d\beta}{dU} = f(U)$ , где  $\beta$  – дифференциальный показатель

наклона вольт-амперных характеристик) установлено влияние  $\gamma$ -облучения на концентрацию глубоких уровней, участвующих в создании туннельного потока. Показано, что при дозе 0,2 МРад амплитуда экстремума уменьшается, а при 0,4 МРад увеличивается, что согласуется с поведением прямого и обратного туннельного потока.

**Ключевые слова:** светодиод, квантовая яма,  $\gamma$ -облучение, рекомбинационная спектроскопия

**Для цитирования:** Вострецова Л. Н., Махмуд-Ахунов М. Ю., Чулакова А. А. Деградация структур на основе InGaN/GaN под действием  $\gamma$ -облучения // Известия высших

## The degradation of InGaN/GaN-based structures under the action of gamma-radiation

L.N. Vostretsova<sup>1</sup>, M.Yu. Makhmud-Akhunov<sup>2</sup>, A.A. Chulakova<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia

<sup>1</sup>Kapiton04@yandex.ru, <sup>2</sup>maratmau@mail.ru, <sup>3</sup>tchulakowa@mail.ru

**Abstract.** *Background.* Currently, GaN/InGaN heterostructures are the main element base of modern optoelectronics. The widespread use of InGaN-based structures causes high reliability requirements. In order to ensure high reliability of photostructures, it is necessary to understand the mechanisms of radiative and non-radiative recombination, degradation mechanisms in these materials, and, consequently, to understand the nature of internal defects that affect the electrical and optical characteristics of LEDs. An important place is given to the study of the radiation resistance of heterostructures based on InGaN/GaN, which is associated with the ability to reveal the nature of defects existing in the studied samples, to investigate the effect of detected defects on the effectiveness of LED structures. The purpose of this work is to study the effect of gamma radiation on the electrical characteristics of LED structures based on InGaN/GaN blue glow. *Materials and methods.* Blue LEDs based on InGaN/GaN (wavelength at room temperature 470 nm) are being investigated. To achieve this goal, direct and reverse volt-ampere characteristics were measured on an automated measuring unit in the range of gamma radiation doses of 0–0.4 MRad. The methods of recombination spectroscopy and nonstationary deep-level spectroscopy were used to explain the detected changes in the volt-ampere characteristics. *Results.* It is established that the main mechanism of current transfer in the voltage range up to 2.5 V for the studied structures is tunneling. In the same voltage range, the dependence of the forward and reverse current on the dose of gamma radiation is observed: at 0.2 MRad, there is a decrease in current relative to the unirradiated sample, at 0.4 MRad, an increase in current relative to the unirradiated sample. Recombination spectroscopy and unsteady spectroscopy of deep levels revealed a level with an energy of  $0.6 \pm 0.02$  eV involved in the creation of a tunnel flow. *Conclusions.* Using a generalized recombination model, it is shown that the magnitude of the tunnel current depends on the concentration of deep centers that create energy levels in the forbidden zone. The recombination spectroscopy method (according to the dependence  $\frac{d\beta}{dU} = f(U)$ , where  $\beta$  is the differential indicator of the slope of the volt-ampere characteristics) established the effect of gamma irradiation on the concentration of deep levels involved in the creation of a tunnel flow. It is shown that at a dose of 0.2 MRad, the amplitude of the extremum decreases, and at 0.4 MRad increases, which is consistent with the behavior of forward and reverse tunneling.

**Keywords:** LED, quantum well, gamma irradiation, recombination spectroscopy

**For citation:** Vostretsova L.N., Makhmud-Akhunov M.Yu., Chulakova A.A. The degradation of InGaN/GaN-based structures under the action of gamma-radiation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences*. 2022;(2):72–84. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3040-2022-3-7

### 1. Актуальность и цели работы

В настоящее время гетероструктуры GaN/InGaN являются основной элементной базой современной оптоэлектроники. На основе таких структур

создаются светоизлучающие приборы, работающие в спектральном диапазоне от зеленого света до ближнего УФ [1], дисплеи на основе синих и зеленых микросветодиодов [2–4], системы связи для организации оптической передачи данных со скоростью более 1 Гбит/с [5, 6]. Широкое распространение устройств на основе InGaN обуславливает высокие требования к надежности. Для обеспечения высокой надежности наногетероструктур необходимо понимание механизмов излучательной и безызлучательной рекомбинации, механизмов деградации, а следовательно, и понимание природы внутренних дефектов, оказывающих влияние на электрические и оптические характеристики светодиодов (СД) [7]. В настоящее время известно, что внутренние дефекты в СД на основе InGaN приводят к падению эффективности в области высоких токов. Так, в работах [8–15] наблюдаемое падение эффективности связывают с увеличением доли прыжковой проводимости (туннельной составляющей тока) через обедненную  $n$ -область, которая осуществляется по протяженным дефектам.

С другой стороны, дефекты в структурах используются для улучшения эксплуатационных характеристик. В статье [16] предложен способ получения квантовых точек со значительно более высокой концентрацией индия, основанный на использовании уже существующих дефектов в СД на основе InGaN ( $V$ -образных ямок, которые образуются из-за естественных дислокаций в материале).

Большое внимание уделяется изучению радиационной стойкости гетероструктур на основе InGaN/GaN, что связано с возможностью вскрывать природу существующих в образцах дефектов, исследовать влияние обнаруженных дефектов на эффективность СД-структур. Вопрос влияния внешнего излучения на характеристики структур на основе InGaN/GaN спорен. Так, в работе [17] исследуется влияние больших доз  $\gamma$ -излучения на электрические характеристики светодиодов на основе InGaN (диапазон длин волн от 410 до 510 нм). Установлено, что интенсивность светового потока для 410 нм диодов была уменьшена на 20 % после дозы 150 МРад и на 75 % после 2 ГРад. В статье [18] исследовалось влияние малых и больших доз  $\gamma$ -облучения на электрические характеристики транзисторов AlGaIn/GaN с высокой подвижностью. Показано, что при низких дозах  $\gamma$ -облучения (до  $\sim 300$  Гр) диффузионная длина неосновного носителя в AlGaIn/GaN увеличивается. Для больших доз  $\gamma$ -облучения (выше 400 Гр) наблюдалось ухудшение транспортных свойств и характеристик устройства, что связано с более высокой плотностью глубоких ловушек в запрещенной зоне. В работах [19–21] обнаружено повышение интенсивности излучения в определенном диапазоне доз для светодиодов на основе InGaIn/GaN.

Целью данной работы является исследование влияния  $\gamma$ -излучения на электрические характеристики светодиодных структур на основе InGaIn/GaN синего свечения.

## 2. Методика эксперимента

Объектом исследования являются синие светодиоды на основе InGaIn/GaN (длина волны 470 нм при комнатной температуре).

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились на автоматизированной измерительной установке, блок-схема которой представлена на рис. 1.

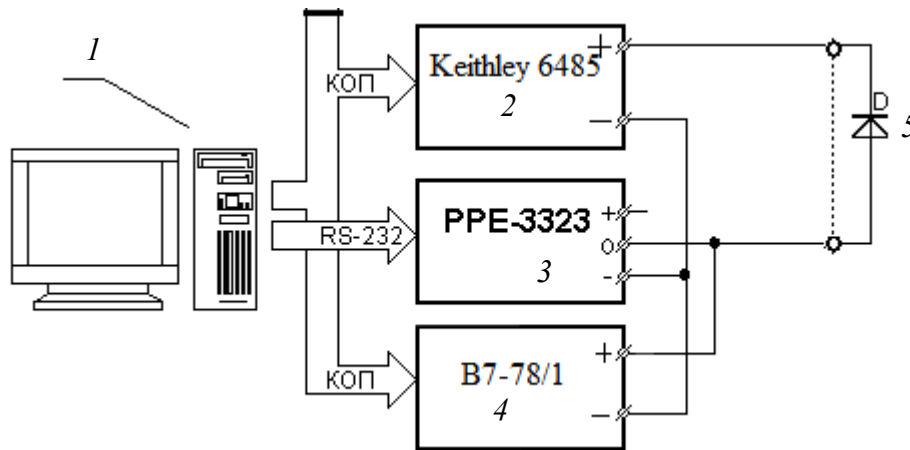


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения ВАХ: 1 – ЭВМ;  
2 – пикоамперметр Keithley 6485; 3 – источник питания;  
4 – универсальный вольтметр В7-78/1; 5 – исследуемый образец

Облучение исследуемых структур проводилось в специальной установке, состоящей из источника излучения и камеры, образованной свинцовыми ограждениями. В качестве источника облучения использовался изотоп Cs-137. Поглощенная доза облучения регулировалась временем облучения.

### 3. Результаты эксперимента

На рис. 2 представлены прямые и обратные ВАХ исследуемых структур на основе InGaN/GaN, облученных дозами  $\gamma$ -квантов 0–0,4 МРад.

Как видно из рис. 2, облучение  $\gamma$ -квантами меняет как прямые, так и обратные ВАХ. На прямых ВАХ в области напряжения меньше 2,5 В при дозе облучения 0,2 МРад происходит уменьшение тока через образец относительно необлученного образца, а при дозе облучения 0,4 МРад происходит увеличение тока относительно необлученного образца (рис. 2,а). Похожая зависимость от дозы облучения  $\gamma$ -квантами наблюдается и для обратной ВАХ (рис. 2,б).

Известно, что в структурах на основе InGaN/GaN электроны и дырки пространственно разделены из-за наличия потенциальных барьеров. В таких структурах туннелирование является одной из стадий процесса рекомбинации. В работах [22, 23] предлагается модель рекомбинации в наноразупорядоченных структурах, учитывающая как классическую рекомбинационную модель Шокли – Рида, так и процесс туннелирования.

Механизм токопереноса можно определить, используя температурные зависимости прямых и обратных ВАХ [24, 25]. Для этого используется зависимость энергии активации токопереноса от приложенного напряжения прямого или обратного смещения. Энергия активации  $E_a$  определяется при фиксированном напряжении смещения как

$$E_a = k \cdot \lg \alpha, \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана, эВ/К;  $\alpha$  – угол наклона зависимости  $\ln I = f(1/T)$ , здесь  $T$  – температура исследуемого образца, К.

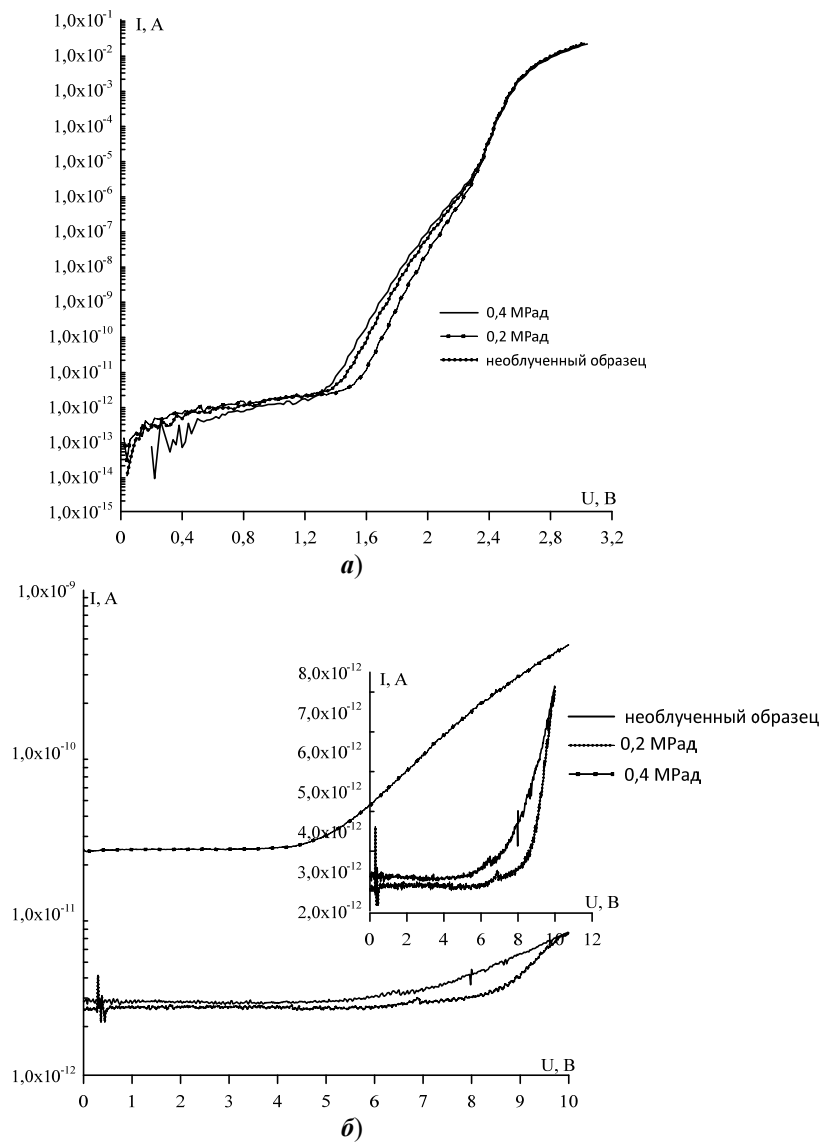


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики структуры на основе InGaN/GaN с дозой облучения 0–0,4 МРад: *a* – прямые вольт-амперные характеристики; *б* – обратные вольт-амперные характеристики (на вставке даны обратные ВАХ в линейном масштабе для доз 0 Рад и 0,2 МРад)

На рис. 3 приведена зависимость энергии активации от напряжения для необлученного образца.

Как видно из рис. 3, *a*, энергия активации  $E_a$  при прямом напряжении смещения ниже прямой  $(E_g - qU)/2$  на всем интервале напряжений прямого смещения меньше 2,5 В, следовательно в этом диапазоне напряжений преобладает туннельный токоперенос [24]. При обратном напряжении смещения энергия активации  $E_a$  меньше значения  $E_g/2$ , следовательно за формирование обратных ВАХ также отвечает туннельный механизм токопереноса [25].

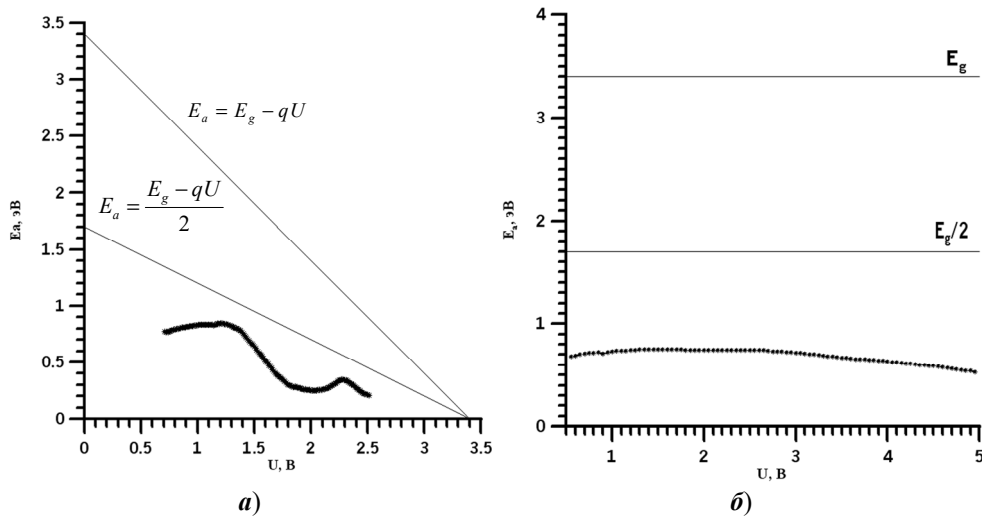


Рис. 3. Зависимость энергии активации тока от напряжения прямого смещения ( $E_g(\text{GaN}) = 3,4$  эВ,  $q$  – заряд электрона) (а); зависимость энергии активации тока от напряжения обратного смещения (б)

В работах [22, 26] показано, что вид туннельного участка ВАХ зависит от особенностей исследуемых структур. Для анализа вида ВАХ используется понятие приведенной скорости рекомбинации [25, 27, 28], которая рассматривается как физическая величина, обратная времени жизни носителей заряда в области пространственного заряда (ОПЗ). При туннельном токопереносе туннельная компонента превалирует над рекомбинационной [22, 26]:

$$\sqrt{c_n c_p} n_i \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) \ll \omega N, \quad (2)$$

где  $\omega$  – вероятность туннельного перехода;  $c_n$  и  $c_p$  – коэффициенты захвата электронов и дырок локализованными состояниями;  $N$  – концентрация локальных состояний в запрещенной зоне;  $q$  – заряд электрона;  $T$  – температура образца, К, а ВАХ наноразупорядоченных полупроводниковых структур описывается выражением

$$I_r(U) \sim R_{\text{пр}}(U) \cdot \exp\left(\frac{qU}{\beta kT}\right), \quad (3)$$

где  $R_{\text{пр}} = \frac{N\sqrt{c_p c_n}}{2}$  – приведенная скорость рекомбинации;  $\beta$  – дифференциальный показатель наклона ВАХ.

Выражение (3) показывает зависимость туннельного тока от концентрации локальных центров в запрещенной зоне (глубоких уровней). Можно предположить, что при облучении происходит залечивание дефектов, ответственных за формирование энергетических уровней в запрещенной зоне. С ростом дозы  $\gamma$ -облучения увеличивается количество дефектов, что приводит к росту туннельного тока как на прямых ВАХ при напряжениях, меньших 2,5 В, так и на обратных ВАХ.

Для определения параметров глубоких центров, участвующих в формировании туннельного тока, были использованы метод нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) и зависимость от напряжения дифференциального показателя наклона прямой ВАХ [23, 27–29].

На рис. 4,а приведены спектры DLTS для исследуемой структуры. Спектры DLTS представляют собой зависимость изменения емкости  $\Delta C$  от температуры [27]. При определенной стационарной температуре на исследуемую структуру подается импульс вначале обогащающий, а затем обедняющий ОПЗ, и определяется изменение емкости  $\Delta C$  за промежуток времени от  $t_1$  до  $t_2$ . При температуре экстремума кривой  $\Delta C = f(T)$  определяется скорость эмиссии носителей заряда с глубокого уровня  $e_{n(p)}^t$ , по зависимости которой от обратной температуры (рис. 4,б) можно определить энергию рассматриваемого уровня. Расчет показал, что в исследуемой структуре существует глубокий уровень в запрещенной зоне, энергия которого  $E_t = 0,6 \pm 0,02$  эВ.

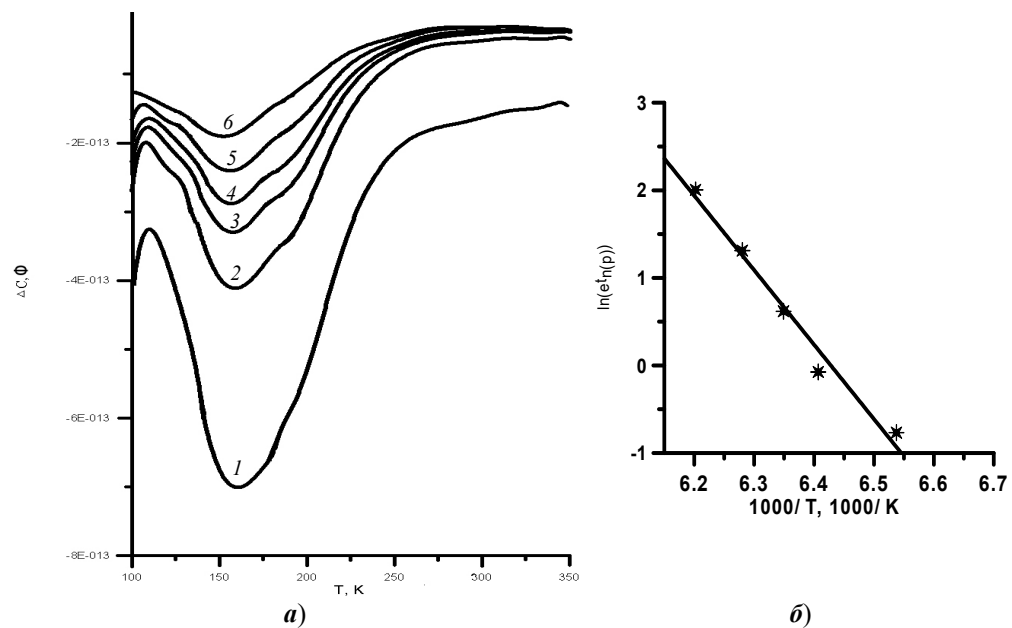


Рис. 4. Спектр DLTS для отношения  $t_2/t_1 = 8$  (а): 1 –  $t_1 = 1\Delta t$ ,  $t_2 = 8\Delta t$ ; 2 –  $t_1 = 2\Delta t$ ,  $t_2 = 16\Delta t$ ; 3 –  $t_1 = 4\Delta t$ ,  $t_2 = 32\Delta t$ ; 4 –  $t_1 = 8\Delta t$ ,  $t_2 = 64\Delta t$ ; 5 –  $t_1 = 16\Delta t$ ,  $t_2 = 128\Delta t$ ; 6 –  $t_1 = 32\Delta t$ ,  $t_2 = 256\Delta t$ ; б – зависимость скорости термической эмиссии от обратной температуры

В работах [28, 29] рекомендуется использовать для определения параметров рекомбинационных центров в исследуемых структурах зависимости  $\frac{d\beta}{dU} = f(U)$ , где экстремумы дают информацию об энергетическом положении уровня и их концентрации в исследуемых структурах. На рис. 5 приведены зависимости дифференциального показателя наклона и его производной от напряжения для исследуемых структур на основе InGaN/GaN при разных дозах облучения.

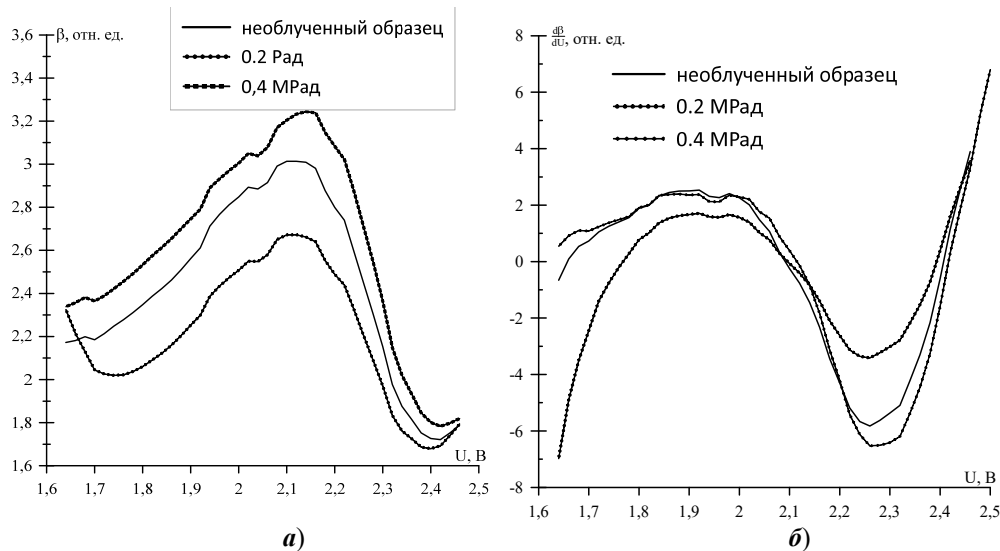


Рис. 5. График зависимости дифференциального показателя наклона ВАХ от напряжения при разных дозах облучения исследуемых структур

на основе InGaN/GaN (а); график зависимости  $\frac{d\beta}{dU} = f(U)$

при разных дозах облучения исследуемых структур на основе InGaN/GaN (б)

Из рис. 5 видно, что на зависимости  $\frac{d\beta}{dU} = f(U)$  можно выделить минимум при напряжении  $U_{\min} = 2,28$  В (энергия глубокого центра  $0,56 \pm \pm 0,04$  эВ), на поведение которого облучение оказывает существенное влияние. Сначала мы наблюдаем уменьшение амплитуды этого минимума (доза облучения 0,2 МРад), а затем увеличение амплитуды этого минимума с увеличением дозы облучения (0,4 МРад). В работах [28, 29] показано, что амплитуда экстремума  $\frac{d\beta}{dU} = f(U)$  зависит от концентрации глубоких центров, образующих уровень, следовательно облучение исследуемых структур  $\gamma$ -квантами оказывает влияние на концентрацию глубоких центров.

### Заключение

В работе исследовано влияние облучения на электрические характеристики светодиодных структур на основе InGaN/GaN. Выявлено изменение прямых и обратных ВАХ: при дозе облучения 0,2 МРад наблюдается уменьшение тока, при дозе облучения 0,4 МРад – увеличение тока (для прямых ВАХ в диапазоне напряжений менее 2,5 В).

Установлено, что основным механизмом токопереноса для обратных ВАХ и прямых ВАХ в диапазоне напряжений до 2,5 В является туннелирование. Показано, что величина туннельного тока зависит от концентрации глубоких центров, создающих энергетические уровни в запрещенной зоне.

Методами рекомбинационной спектроскопии и нестационарной спектроскопии глубоких уровней в исследуемой структуре был обнаружен глубо-

кий уровень с энергией  $0,6 \pm 0,02$  эВ. По зависимости  $\frac{d\beta}{dU} = f(U)$  (глубокому уровню соответствует минимум при напряжении 2,28 эВ) установлено влияние  $\gamma$ -облучения на концентрацию глубоких уровней, соответствующих указанной энергии. Показано, что при дозе 0,2 Мрад амплитуда экстремума уменьшается, а при 0,4 Мрад увеличивается, что согласуется с поведением туннельного тока на прямых и обратных ВАХ.

### Список литературы

1. Denbaars S. P. et al. Development of gallium-nitride-based light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes for energy-efficient lighting and displays // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61 (3). P. 945–951.
2. Huang Y., Hsiang E.-L., Deng M.-Y., Wu S.-T. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives // *Light: Science & Applications*. 2020. Vol. 9. P. 105. URL: <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0341-9>
3. Parbrook P. J., Corbett B., Han J., Seong T.-Y., Amano H. Micro-Light Emitting Diode: From Chips to Applications // *Laser & Photonics Reviews*. 2021. Vol. 15. P. 2000133. URL: <https://doi.org/10.1002/lpor.202000133>
4. Lee S.-L., Cheng C.-C., Liu C.-J., Yeh C.-N., Lin Y.-C. 9.4-inch 228-ppi flexible micro-LED display // *Journal of Society for Information Display*. 2021. Vol. 29, iss. 5. P. 360–369. URL: <https://doi.org/10.1002/jsid.1022>
5. Shi J. W., Chi K. L., Wun J. M., Bowers J. E., Sheu J. K. GaN based Cyan light-emitting diodes with GHz bandwidth // *IEEE Photonics Conf. IPC, IEEE, Piscataway, New Jersey*. 2016. P. 623–624. URL: <https://doi.org/10.1109/IPCON.2016.7831257>
6. Pepe A., Chen C.-J., Fu H. Y., Chen K.-C., Wang L., Wang L., Zhang L., Wu M.-C., Liu X., Luo Y., Dong Y., Wei Z., Wang L., Luo Y., Fu H. Y., Fu H. Y. 2 Gbps/3 m air-underwater optical wireless communication based on a single-layer quantum dot blue micro-LED // *Optics Letters*. 2020. Vol. 45, iss. 9. P. 2616–2619. URL: <https://doi.org/10.1364/OL.393664>
7. Buffolo M., Caria A., Piva F., Roccato N., Casu C., De Santi C., Meneghesso G., Zanoni E., Meneghini M. Defects and Reliability of GaN-Based LEDs: Review and Perspectives // *Phys. Status Solidi A*. 2022. Vol. 219. P. 2100727.
8. Kim Jaekyun, Tak Youngjo, Kim Joosung, Chae Suhee, Kim Jun-Youn, Park Youngsoo Analysis of forward tunneling current in InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes grown on Si (111) substrate // *Journal of Applied Physics*. 2013. Vol. 114. P. 013101.
9. Lin Yue, Zhang Yong, Guo Ziquan, Zhang Jihong, Huang Weilin, Lu Yi-Jun, Deng Zhonghua, Liu Zhuguang and Cao Yongge Defects dynamics during ageing cycles of InGaN blue light-emitting diodes revealed by evolution of external quantum efficiency – current dependence // *Optics Express*. 2015. Vol. 23, iss. 15. P. A979.
10. Бочкарева Н. И., Шретер Ю. Г. Влияние глубоких центров на конфайнмент носителей в квантовых ямах InGaN/GaN и эффективность светодиодов // *Физика и техника полупроводников*. 2018. Т. 52, № 7. С. 796–803.
11. Pavesi M., Manfredi M., Rossi F., Meneghini M., Zanoni E., Zehnder U., Strauss U. Temperature dependence of the electrical activity of localized defects in InGaN-based light emitting diodes // *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 89. P. 041 917.
12. Peter M., Laubsch A., Bergbauer W., Meyer T., Sabathil M., Baur J., Hahn B. New developments in green LEDs // *Phys. Status Solidi A*. 2009. Vol. 206. P. 1125.
13. Bochkareva N. I., Rebane Y. T., Shreter Y. G. Efficiency droop and incomplete carrier localization in InGaN/GaN quantum well light-emitting diodes // *Applied Physics Letters*. 2013. Vol. 103. P. 191 101.

14. Бочкарева Н. И., Ребане Ю. Т., Шретер Ю. Г. Рост скорости рекомбинации Шокли – Рида – Холла в квантовых ямах InGaN/GaN как основной механизм падения эффективности светодиодов при высоких уровнях инжекции // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 12. С. 1714–1719.
15. Бочкарева Н. И., Ребане Ю. Т., Шретер Ю. Г. Падение эффективности GaN – светодиодов при высоких плотностях тока: туннельные токи утечки и неполная латеральная локализация носителей в квантовых ямах InGaN/GaN // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48, № 8. С. 1107–1116.
16. Chung J.-Y., Li Z., Goodman S. A., So J., Syaranamual G. J., Mishra T. P., Fitzgerald E. A., Bosman M., Lee K., Pennycook S. J., Gradečak S. Light-Emitting V-Pits: An Alternative Approach toward Luminescent Indium-Rich InGaN Quantum Dots // ACS Photonics. 2021. Vol. 8 (10). P. 2853–2860.
17. Khanna R., Han S. Y., Pearton S. J. High dose Co-60 gamma irradiation of InGaN quantum well light-emitting diodes // Applied Physics Letters. 2005. Vol. 87. P. 212107. URL: <https://doi.org/10.1063/1.2132085>
18. Yadav A., Flitsyan E., Chernyak L., Hwang Y.-H., Hsieh Y.-L., Lei L., Ren F., Pearton S. J., Lubomirsky I. Low and moderate dose gamma-irradiation and annealing impact on electronic and electrical properties of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors // Radiation Effects and Defects in Solids. 2015. Vol. 170 (5). P. 377–385.
19. Шукайло В. П., Оболенский С. В., Басаргина Н. В., Ворожцова И. В., Дубровских С. М., Ткачёв О. В. Люминесценция GaN и GaAs диодов при n-γ-облучении // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2012. № 5 (1). С. 60–64.
20. Грушко Н. С., Солонин А. П. Влияние гамма-излучения на электрофизические параметры светодиодов на основе InGaIn/GaN // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 92–95.
21. Вострецова Л. Н., Адамович А. А. Влияние γ-облучения на электрические и оптические характеристики светодиодов на основе InGaIn/GaN // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2020. № 4. С. 69–78.
22. Булярский С. В., Рудь Ю. В., Вострецова Л. Н., Кагарманов А. С., Трифонов О. Ю. Туннельная рекомбинация в полупроводниковых структурах с наноразупорядочением // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43, № 4. С. 460–466.
23. Булярский С. В., Грушко Н. С. Обобщенная модель рекомбинации в неоднородных полупроводниковых структурах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2000. Т. 118, № 5. С. 1222–1237.
24. Грушко Н. С., Лакалин А. В., Сомов А. Н. Определение механизма токопереноса в p-n-переходах по анализу температурной зависимости прямой вольт-амперной характеристики // Оптика. Оптоэлектроника и технологии : тр. Междунар. конф. Ульяновск, 2003. С. 78.
25. Булярский С. В., Грушко Н. С., Сомов А. И. Физические основы диагностики полупроводников : учеб.-метод. пособие. Ульяновск, 1998. 92 с.
26. Вострецова Л. Н., Кузнецова Т. Ю., Амброзевич А. С. Вольт-амперные характеристики структур на основе InGaIn/GaN при высоком уровне инжекции // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2019. № 2. С. 75–85.
27. Булярский С. В., Грушко Н. С., Лакалин А. В. Рекомбинационная спектроскопия глубоких центров в GaP светодиодах // Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32. С. 1193–1198.
28. Булярский С. В. Инновационные методы диагностики. Ульяновск, 2006. 203 с.
29. Булярский С. В., Грушко Н. С. Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах. М. : МГУ, 1995. 400 с.

## References

1. Denbaars S.P. et al. Development of gallium-nitride-based light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes for energy-efficient lighting and displays. *Acta Materialia*. 2013;61(3):945–951.
2. Huang Y., Hsiang E.-L., Deng M.-Y., Wu S.-T. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives. *Light: Science & Applications*. 2020;9:105. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0341-9>
3. Parbrook P.J., Corbett B., Han J., Seong T.-Y., Amano H. Micro-Light Emitting Diode: From Chips to Applications. *Laser & Photonics Reviews*. 2021;15:2000133. Available at: <https://doi.org/10.1002/lpor.202000133>
4. Lee S.-L., Cheng C.-C., Liu C.-J., Yeh C.-N., Lin Y.-C. 9.4-inch 228-ppi flexible micro-LED display. *Journal of Society for Information Display*. 2021;29(5):360–369. Available at: <https://doi.org/10.1002/jsid.1022>
5. Shi J.W., Chi K.L., Wun J.M., Bowers J.E., Sheu J.K. GaN based Cyan light-emitting diodes with GHz bandwidth. *IEEE Photonics Conf. IPC, IEEE, Piscataway, New Jersey*. 2016:623–624. Available at: <https://doi.org/10.1109/IPCON.2016.7831257>
6. Pepe A., Chen C.-J., Fu H.Y., Chen K.-C., Wang L., Wang L., Zhang L., Wu M.-C., Liu X., Luo Y., Dong Y., Wei Z., Wang L., Luo Y., Fu H.Y., Fu H.Y. 2 Gbps/3 m air–underwater optical wireless communication based on a single-layer quantum dot blue micro-LED. *Optics Letters*. 2020;45(9):2616–2619. Available at: <https://doi.org/10.1364/OL.393664>
7. Buffolo M., Caria A., Piva F., Roccato N., Casu C., De Santi C., Meneghesso G., Zanoni E., Meneghini M. Defects and Reliability of GaN-Based LEDs: Review and Perspectives. *Phys. Status Solidi A*. 2022;219:2100727.
8. Kim Jaekyun, Tak Youngjo, Kim Joosung, Chae Suhee, Kim Jun-Youn, Park Youngsoo Analysis of forward tunneling current in InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes grown on Si (111) substrate. *Journal of Applied Physics*. 2013;114:013101.
9. Lin Yue, Zhang Yong, Guo Ziquan, Zhang Jihong, Huang Weilin, Lu Yi-Jun, Deng Zhonghua, Liu Zhuguang and Cao Yongge Defects dynamics during ageing cycles of InGaN blue light-emitting diodes revealed by evolution of external quantum efficiency – current dependence. *Optics Express*. 2015;23(15):A979.
10. Bochkareva N.I., Shreter Yu.G. The effect of deep centers on carrier confinement in InGaN/GaN quantum wells and LED Efficiency. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Physics and technology of semiconductors*. 2018;52(7):796–803. (In Russ.)
11. Pavesi M., Manfredi M., Rossi F., Meneghini M., Zanoni E., Zehnder U., Strauss U. Temperature dependence of the electrical activity of localized defects in InGaN-based light emitting diodes. *Applied Physics Letters*. 2006;89:041 917.
12. Peter M., Laubsch A., Bergbauer W., Meyer T., Sabathil M., Baur J., Hahn B. New developments in green LEDs. *Phys. Status Solidi A*. 2009;206:1125.
13. Bochkareva N.I., Rebane Y.T., Shreter Y.G. Efficiency droop and incomplete carrier localization in InGaN/GaN quantum well light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*. 2013;103:191 101.
14. Bochkareva N.I., Rebane Yu.T., Shreter Yu.G. Growth of the Shockley-Reed-Hall recombination rate in InGaN/GaN quantum wells as the main mechanism for decreasing the efficiency of leds at high injection levels. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Physics and technology of semiconductors*. 2015;49(12):1714–1719. (In Russ.)
15. Bochkareva N.I., Rebane Yu.T., Shreter Yu.G. Efficiency drop of GaN – LEDs at high current densities: tunneling leakage currents and incomplete lateral carrier localization in quantum wells InGaN/GaN. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Physics and technology of semiconductors*. 2014;48(8):1107–1116. (In Russ.)

16. Chung J.-Y., Li Z., Goodman S.A., So J., Syaranamual G.J., Mishra T.P., Fitzgerald E.A., Bosman M., Lee K., Pennycook S.J., Gradečak S. Light-Emitting V-Pits: An Alternative Approach toward Luminescent Indium-Rich InGa<sub>N</sub> Quantum Dots. *ACS Photonics*. 2021;8(10):2853–2860.
17. Khanna R., Han S.Y., Pearton S.J. High dose Co-60 gamma irradiation of InGa<sub>N</sub> quantum well light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*. 2005;87:212107. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.2132085>
18. Yadav A., Flitsiyan E., Chernyak L., Hwang Y.-H., Hsieh Y.-L., Lei L., Ren F., Pearton S.J., Lubomirsky I. Low and moderate dose gamma-irradiation and annealing impact on electronic and electrical properties of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistors. *Radiation Effects and Defects in Solids*. 2015;170(5):377–385.
19. Shukaylo V.P., Obolenskiy S.V., Basargina N.V., Vorozhtsova I.V., Dubrovskikh S.M., Tkachev O.V. Luminescence Ga<sub>N</sub> and GaAs LED's under the gamma-radiation. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo = Bulletin of Lobachevsky University of Nizhny Novgorod*. 2012;(5):60–64. (In Russ.)
20. Grushko N.S., Solonin A.P. Influence of gamma-radiation on the electrophysical parameters of LEDs based on InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>. *Prikladnaya fizika = Applied physics*. 2011;(1):92–95. (In Russ.)
21. Vostretsova L.N., Adamovich A.A. Effect of gamma-radiation on the electrical and optical characteristics of LEDs based on InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences*. 2020;(4):69–78. (In Russ.)
22. Bulyarskiy S.V., Rud' Yu.V., Vostretsova L.N., Kagarmanov A.S., Trifonov O.Yu. Tunneling recombination in semiconductor structures with nanodisordering. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Physics and technology of semiconductors*. 2009;43(4):460–466. (In Russ.)
23. Bulyarskiy S.V., Grushko N.S. Generalized model of recombination in inhomogeneous semiconductor structures. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki = Journal of experimental and theoretical physics*. 2000;118(5):1222–1237. (In Russ.)
24. Grushko N.S., Lakalin A.V., Somov A.N. Determination of the mechanism of current transfer in p-n junctions by analyzing the temperature dependence of the direct current-voltage characteristic. *Optika. Optoelektronika i tekhnologii: tr. Mezhdunar. konf. = Optics. Optoelectronics and technologies: proceedings of an International conference*. Ul'yanovsk, 2003:78. (In Russ.)
25. Bulyarskiy S.V., Grushko N.S., Somov A.I. *Fizicheskie osnovy diagnostiki poluprovodnikov: uchebno-metod. posobie = Physical basis of semiconductor diagnostics: textbook allowance*. Ul'yanovsk, 1998:92. (In Russ.)
26. Vostretsova L.N., Kuznetsova T.Yu., Ambrozevich A.S. Current-voltage characteristics of structures based on InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> at high level of injection. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences*. 2019;(2):75–85. (In Russ.)
27. Bulyarskiy S.V., Grushko N.S., Lakalin A.V. Recombination spectroscopy of deep centers in GaP LEDs. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Physics and technology of semiconductors*. 1998;32:1193–1198. (In Russ.)
28. Bulyarskiy S.V. *Innovatsionnye metody diagnostiki = Innovative diagnostic methods*. Ul'yanovsk, 2006:203. (In Russ.)
29. Bulyarskiy S.V., Grushko N.S. *Generatsionno-rekombinatsionnye protsessy v aktivnykh elementakh = Generation-recombination processes in active elements*. Moscow: MGU, 1995:400. (In Russ.)

**Информация об авторах / Information about the authors**

***Любовь Николаевна Вострецова***

кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры инженерной физики,  
Ульяновский государственный  
университет (Россия, г. Ульяновск,  
ул. Льва Толстого, 42)

E-mail: Kapiton04@yandex.ru

***Lyubov' N. Vostretsova***

Candidate of physical and mathematical  
sciences, associate professor  
of the sub-department of engineering  
physics, Ulyanovsk State University  
(42 Lva Tolstogo street, Ulyanovsk, Russia)

***Марат Юсупович Махмуд-Ахунов***

кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры физического  
материаловедения, Ульяновский  
государственный университет (Россия,  
г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42)

E-mail: maratmau@mail.ru

***Marat Yu. Makhmud-Akhunov***

Candidate of physical and mathematical  
sciences, associate professor  
of the sub-department of physical materials  
science, Ulyanovsk State University  
(42 Lva Tolstogo street, Ulyanovsk, Russia)

***Амина Азатовна Чулакова***

студентка, Ульяновский  
государственный университет (Россия,  
г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42)

E-mail: tchulakowa@mail.ru

***Amina A. Chulakova***

Student, Ulyanovsk State  
University (42 Lva Tolstogo street,  
Ulyanovsk, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 10.08.2022**

**Поступила после рецензирования и доработки / Revised 21.09.2022**

**Принята к публикации / Accepted 05.10.2022**