

## ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 4. С. 372–380

*Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2021, vol. 21, iss. 4, pp. 372–380

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-4-372-380>

Научная статья  
УДК 621.315.592

### Влияние подсветки на вольт-амперные характеристики структур на основе InGaN/GaN при обратном смещении

Д. Я. Вострецов, Л. Н. Вострецова<sup>✉</sup>, Т. С. Смирнова, Д. П. Дмитриев

Ульяновский государственный университет, Россия, 432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42

Вострецов Дмитрий Ярославович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского технологического института им. С. П. Капицы, [dimka97@mail.ru](mailto:dimka97@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6594-9872>

Вострецова Любовь Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры инженерной физики, [kapiton04@yandex.ru](mailto:kapiton04@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9602-0812>

Смирнова Татьяна Сергеевна, студент 3-го курса инженерно-физического факультета высоких технологий, [smirnovats@stud.ulsu.ru](mailto:smirnovats@stud.ulsu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7422-091X>

Дмитриев Дмитрий Павлович, магистрант 2-го года обучения инженерно-физического факультета высоких технологий, [dmitriev1409@mail.ru](mailto:dmitriev1409@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3207-8681>

**Аннотация.** Рассмотрена обратная ветвь вольт-амперной характеристики структуры с квантовыми ямами при подсветке с точки зрения обобщенной модели рекомбинации. Показано, что в процессе формирования вольт-амперных характеристик при обратном смещении и наличии внешней подсветки участвуют три процесса: оптическая генерация, рекомбинация и туннелирование. При подсветке структуры таким же светодиодом в квантовых ямах ведущую роль играет процесс оптической генерации. В результате получено выражение, описывающее ток через образец в этом случае.

**Ключевые слова:** квантовая яма, токоперенос, обобщенная модель рекомбинации, фотогенерация, туннелирование

**Для цитирования:** Вострецов Д. Я., Вострецова Л. Н., Смирнова Т. С., Дмитриев Д. П. Влияние подсветки на вольт-амперные характеристики структур на основе InGaN/GaN при обратном смещении // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 4. С. 372–380. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-4-372-380>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

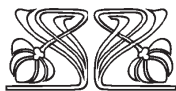
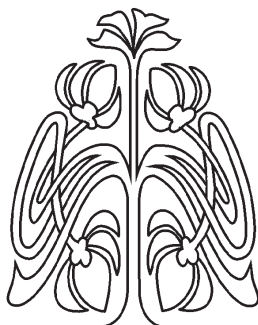
Article

**Influence of backlighting on current-voltage characteristics of InGaN / GaN-based structures with back-shift**

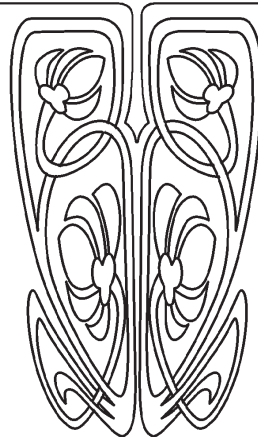
**D. Y. Vostretsov, L. N. Vostretsova<sup>✉</sup>, T. S. Smirnova, D. P. Dmitriev**

Ulyanovsk State University, 42 L. Tolstogo St., Ulyanovsk 432017, Russia

© Вострецов Д. Я., Вострецова Л. Н., Смирнова Т. С., Дмитриев Д. П., 2021



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ





Dmitry Y. Vostretsov, dimka97@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6594-9872>

Liubov N. Vostretsova, kapiton04@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9602-0812>

Tatiana S. Smirnova, smirnovats@stud.ulsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7422-091X>

Dmitry P. Dmitriev, dmitriev1409@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3207-8681>

**Abstract. Object of study.** We investigate Hewlett Packard green LEDs ( $\lambda_{\max} = 525$  nm at room temperature) based on an InGaN solid solution with quantum wells. **Purpose of the Study.** It is known that in light-emitting structures, optical characteristics are closely related to electrical characteristics. Analysis of the literature has shown the effect of the structure (number and width of quantum wells) on the electrical characteristics of the objects under study. Thus, the determination of the parameters of structures based on GaN and its solid solutions from the analysis of electrical characteristics is an urgent problem. The aim of this work is to test the application of the generalized recombination model for analyzing the reverse current-voltage characteristics of InGaN-based structures under illumination. **Methods and Approaches Used.** The paper considers the reverse current-voltage characteristics of structures with quantum wells under illumination with the same "junction-to-junction" LED from the point of view of the generalized model of recombination. The results of measurements and calculations using the generalized recombination model are compared with the distribution profile of the dopant obtained from the inverse capacitance-voltage characteristics. **Main Results.** It has been shown that three processes are involved in the formation of reverse current-voltage characteristics under illumination: photogeneration, recombination, and tunneling. When the structure is illuminated with the same LED in quantum wells, the photorecombination process plays a leading role. An expression has been obtained that describes the current through the sample in this case. **Keywords:** quantum well, current transfer, generalized recombination model, photogeneration, tunneling

**For citation:** Vostretsov D. Y., Vostretsova L. N., Smirnova T. S., Dmitriev D. P. Influence of backlighting on current-voltage characteristics of InGaN / GaN-based structures with back-shift. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2021, vol. 21, iss. 4, pp. 372–380 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-4-372-380>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

В настоящее время проблема транспорта носителей заряда в полупроводниковых структурах с наноразупорядочением занимает ведущее место в исследованиях подобных структур. Особенности транспорта носителей заряда, а следовательно, и механизмов токопереноса обуславливают использование таких систем. Примером полупроводниковых структур с искусственным наноразупорядочением, нашедших широкое применение в современной технике и электронике, являются структуры с квантовыми ямами (КЯ), например на основе твердого раствора GaN. Структуры с КЯ на основе GaN и его твердых растворов применяют для получения излучения в ультрафиолетовом, синем и зеленом диапазоне видимого спектра, что связано с зависимостью величины запрещенной зоны твердого раствора InGaN от содержания индия в нем [1]. Наличие КЯ в излучающих полупроводниковых структурах позволяет повысить эффективность вывода излучения. Подобные структуры широко используются для создания сверхъярких светодиодов (СД), белых СД, лазерных диодов, ультрафиолетовых детекторов. В то же время ряд вопросов переноса электронов и дырок в таких структурах с наноразупорядочением пока далек от решения. Это связано с многообразием наносистем, моделей устройств на их основе, механизмов транспорта носителей заряда в них. Одним из подходов к описанию наноструктурных систем является обобщенная модель рекомбинации [2, 3].

Активное использование структур с КЯ на основе InGaN/GaN ставит вопросы повышения эффективности излучения и диагностики параметров структуры, определяющих электрические и оптические характеристики. Электрические свойства полупроводниковых структур тесно связаны с оптическими свойствами. Известно [4] отрицательное влияние пьезоэлектрических полей, возникающих за счет механических напряжений в GaN на границах с КЯ, на эффективность излучения. В [5] по туннельной составляющей вольт-амперной характеристики (ВАХ) с использованием обобщенной модели рекомбинации [2] были определены параметры глубокого уровня, участвующего в безызлучательной рекомбинации. Проявление этого уровня было обнаружено и по спектрам электролюминесценции структур на основе InGaN/GaN, измеренных в диапазоне температур 77–343 К [6]. В работе [7] показано, что время жизни носителей заряда, а, следовательно, и быстродействие структур с КЯ зависит не только от ширины КЯ, но и от их количества. В [8] было определено, что количество периодов КЯ является ключом к увеличению внешней квантовой эффективности и снижению прямого напряжения для структур на основе InGaN желтого свечения. Таким образом, определение параметров структур на основе GaN и его твердых растворов из анализа электрических характеристик является актуальной задачей.



Цель данной работы – апробация применения обобщенной модели рекомбинации для анализа обратной ветви ВАХ структур на основе InGaN при подсветке.

### 1. Исследуемые образцы и методика эксперимента

Исследовались СД (Hewlett Packard, США) зеленого свечения ( $\hbar\omega_{\max} = 2.43$  эВ,  $\lambda_{\max} = 525$  нм при комнатной температуре) на основе твердого раствора InGaN. Геометрия структуры (наличие и положение КЯ) определялась двумя способами: из вольт-фарадных характеристик (ВФХ) [9] и фотоэлектрическим методом диагностики [10], в котором особенности зависимости фототока от обратного напряжения смещения связываются с

последовательным прохождением границы области пространственного заряда (ОПЗ) через КЯ исследуемой структуры.

При измерении зависимости фототока от обратного напряжения смещения использовалась подсветка таким же СД. Энергия излучения такого СД соответствует излучательной рекомбинации в КЯ, следовательно, и поглощаться такое излучение будет носителями заряда только в КЯ, проходя через широкозонную матрицу. Выбор источника подсветки обусловлен попыткой свести к минимуму оптическую генерацию носителей заряда в матрице GaN.

Измерение ВФХ проводилось на установке, приведенной на рис. 1.

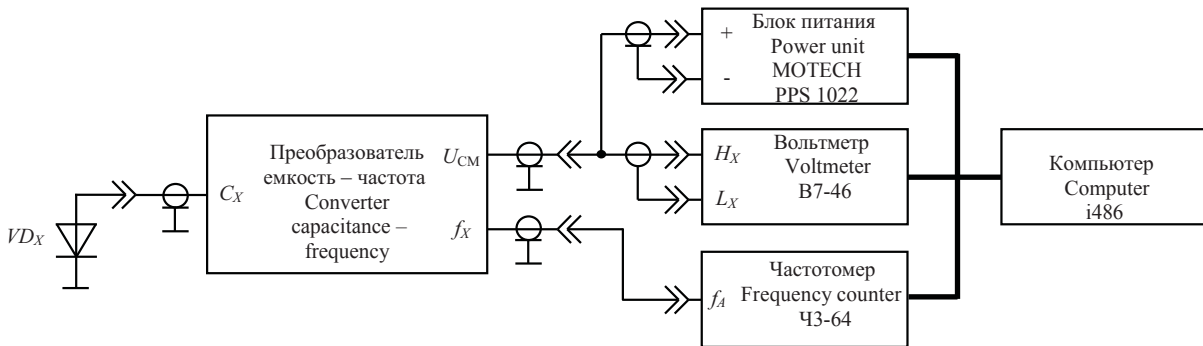


Рис. 1. Блок-схема измерителя емкости  
Fig. 1. Block diagram of the capacitance meter

Особенностью установки является наличие измерителя емкости генераторного типа, состоящего из усилителя и цепи положительной обратной связи по напряжению, в которую включен параллельный LC контур. Исследуемый полупроводниковый прибор включается параллельно LC контуру. Генерируемая генератором частота определяется величинами индуктивности и суммы емкостей контура  $C_0$  и полупроводникового прибора  $C_x$ . Наличие емкости  $C_0$  приводит к уменьшению зависимости частоты генератора от величины емкости исследуемой структуры. Это используется для ограничения диапазона перестройки частоты в процессе измерений. Параметры контура подобраны так, что частота при отсутствии  $C_x$  составляет 1 МГц. Колебательный контур и вся конструкция генератора термостатированы для уменьшения влияния изменения температуры окружающей среды. При этом не требуется долговременная стабильность параметров колебательного контура, так как время измерения одной характеристики со-

ставляет несколько минут, а калибровка прибора проводится перед каждым измерением. Такая схема измерения позволяет добиться точности порядка  $\Delta C/C \sim 10^{-10}$ .

Измерение обратной ветви ВАХ проводилось на автоматизированной установке, блок схема которой представлена на рис. 2.

Анализ экспериментальных данных проводился с использованием положений обобщенной модели рекомбинации [2, 3]. Обобщенная модель рекомбинации описывает электронные переходы при рекомбинации в туннельно-связанных областях, разделенных тонким, туннельно-прозрачным слоем. В каждой из областей имеются центры рекомбинации, распределенные по энергиям в соответствии с некоторым законом, который в общем случае неизвестен. Рекомбинация в каждой из областей может происходить независимо. Однако ввиду того, что разделяющий их слой туннельно прозрачен, свободные носители заряда в процессе рекомбинации могут переходить из одной области в другую.

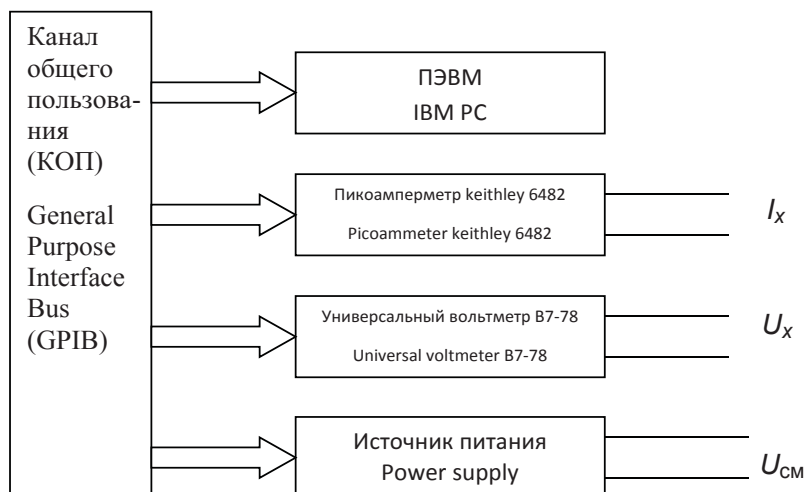


Рис. 2. Измерительная установка ВАХ  
Fig. 2. Measuring unit for current-voltage characteristics

Из обобщенной модели рекомбинации вытекают следующие частные случаи:

- 1) рекомбинация Шокли – Рида;
- 2) индуцированная рекомбинация;
- 3) туннельная рекомбинация.

Наличие такого частного случая как туннельная рекомбинация дает возможность использовать обобщенную модель рекомбинации для описания механизма токопереноса в наноразупорядоченных структурах при прямом и обратном напряжении смещения [2, 5, 11].

## 2. Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены результаты измерения ВФХ и ВАХ при обратном напряжении сме-

щения. Для сравнения приводятся как темновые характеристики, так и характеристики, полученные при подсветке исследуемой структуры таким же СД.

Как видно из рис. 3, подсветка исследуемой структуры таким же СД влияет как на ВФХ (рис. 3, а), так и на ВАХ (рис. 3, б) при обратном смещении. Подсветка не только увеличивает обратный ток структуры, что характерно для явления фотопроводимости, но и приводит к наличию экстремумов на зависимости обратного тока от напряжения смещения, которое в [10] связывают с оптической генерацией носителей заряда в КЯ.

Светодиодные структуры с КЯ относятся к наноразупорядоченным структурам, в которых

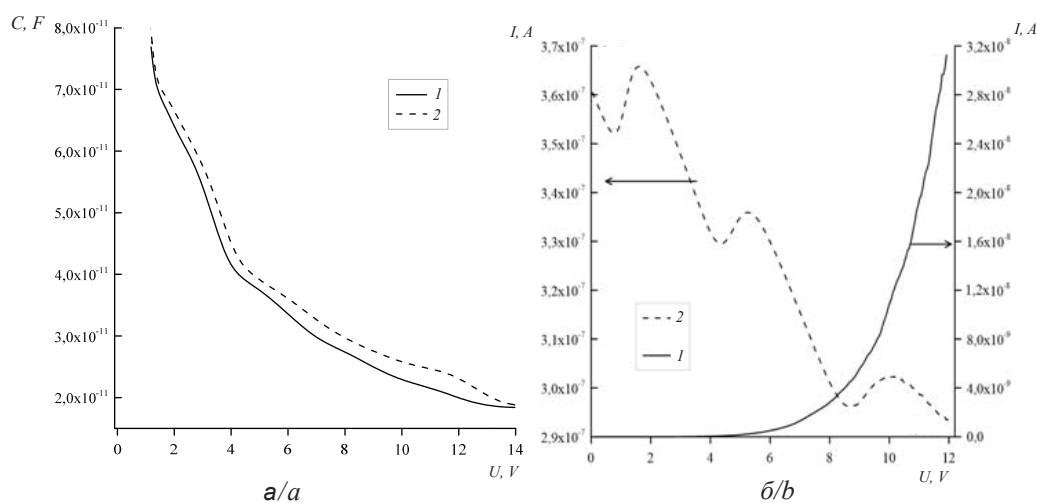


Рис. 3. Результаты измерения: ВФХ при обратном смещении (а); ВАХ при обратном смещении для исследуемой структуры (б); 1 – темновая характеристика, 2 – при подсветке

Fig. 3. Measurement results: CV characteristics with reverse bias (a); I-V characteristic with reverse bias of the structure under study (b); 1 – dark characteristic, 2 – backlit



носители заряда пространственно разделены. Обобщенная модель рекомбинации [2, 3] позволяет описать процесс токопереноса в таких структурах, учитывая возможность туннелирования (рис. 4).

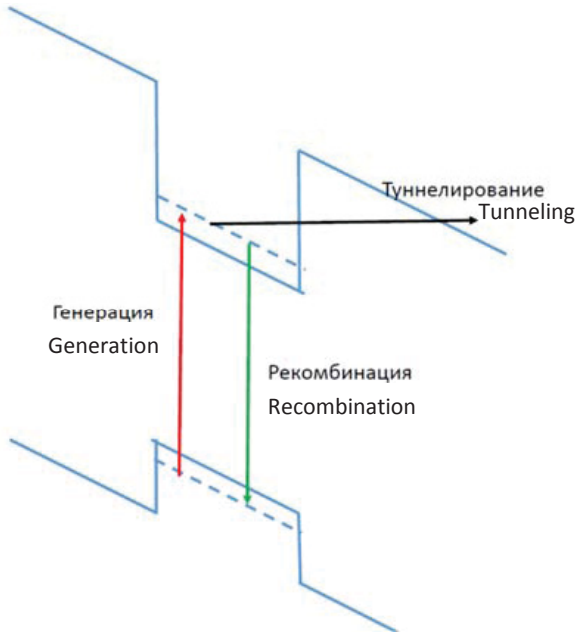


Рис. 4. Квантовая яма при обратном смещении  
Fig. 4. Reverse-biased quantum well

В работах [2, 11–13] обобщенная модель рекомбинации использовалась для описания ВАХ при прямом напряжении смещения структур с КЯ. В случае обратного смещения имеет место экстракция, т.е. обеднение носителями заряда. Этот эффект приводит к тому, что обратный ток определяется генерацией [14]. При подсветке исследуемого СД таким же СД следует учесть, что фототок генерируется светом, энергия квантов которого меньше ширины запрещенной зоны матрицы GaN и равна ширине запрещенной зоны КЯ InGaN, следовательно, оптическая генерация носителей заряда происходит только в КЯ. Ток определяется туннелированием из КЯ. Для того чтобы его вычислить, надо учесть следующее:

- 1) вероятность выхода электронов из КЯ экспоненциально растет с ростом вероятности туннелирования ( $\omega$ );
- 2) величина тока зависит от заселенности квантового уровня вблизи дна ямы; заселенность определяется тремя процессами: генерацией – в нашем случае оптической генерацией ( $g$ ); рекомбинацией – рекомбинацией переизлучения ( $R$ ); туннелированием ( $\omega$ ).

Пусть  $N$  – концентрация состояний КЯ;  $n$  – концентрация электронов в этом состоянии, тогда изменение концентрации носителей заряда в КЯ определяется тремя процессами – оптической генерацией с образованием электронно-дырочной пары, рекомбинацией и туннельным токопереносом (см. рис. 4), т.е.

$$\frac{dn}{dt} = g(N - n) - Rn - \omega n. \quad (1)$$

Рассматриваем квазиравновесную задачу, в этом случае  $\frac{dn}{dt} = 0$ , что дает возможность найти концентрацию электронов в КЯ:

$$n = \frac{gN}{g + R + \omega}. \quad (2)$$

По температурным зависимостям ВАХ можно определить механизмы формирования тока: диффузионный, генерационно-рекомбинационный и туннельный. В работе [14] приведены критерии определения механизма формирования тока для обратной ветви ВАХ на основе анализа температурной зависимости обратного тока структуры. Температурная зависимость тока насыщения определяется в основном экспоненциальной зависимостью от температуры концентрации неосновных носителей заряда и может быть представлена в виде

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (3)$$

где  $E_a$  – энергия активации тока,  $k = 8.625 \cdot 10^{-5}$  эВ/К – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура исследуемой структуры.

Энергия активации токопереноса определяется из зависимости  $\ln I = f(1/T)$ , построенной при различных напряжениях в полулогарифмическом масштабе. Аппроксимировав зависимости прямыми, можно определить энергию активации как

$$E_a = -ktg \alpha, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – угол наклона зависимости  $\ln I = f(1/T)$ .

В [14] соотнесены диапазоны значений энергии активации токопереноса и механизмы, ответственные за формирование тока при обратном смещении в исследуемых структурах:

- 1)  $E_a = E_g(0 K)$  – диффузионный механизм;
- 2)  $\frac{E_g(0 K)}{2} \leq E_a < E_g(0 K)$  – термогенерация с участием глубоких уровней;
- 3)  $E_a < \frac{E_g(0 K)}{2}$  – туннелирование.

На рис. 5 приведена зависимость  $E_a = f(U)$  для исследуемой структуры, определенная по



температурным зависимостям тока при фиксированном напряжении обратного смещения.

Как видно из рис. 5, энергия активации тока меньше  $(E_g)/2$  для исследуемой структуры на всем диапазоне изменения напряжения обратного смещения, следовательно, основной механизм токопереноса – туннелирование.

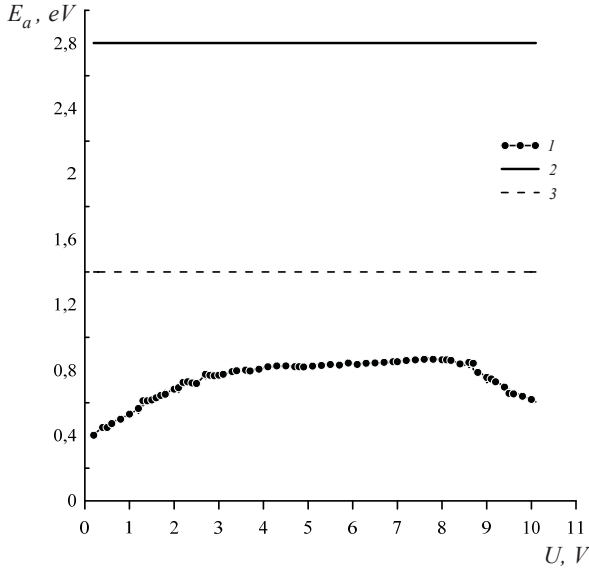


Рис. 5. Зависимость энергии термической активации тока от напряжения обратного смещения: 1 –  $E_a = kTg \alpha$  в диапазоне температур 129–343 К; 2 –  $E_a = E_g$ ; 3 –  $E_a = (E_g)/2$   
 Fig. 5. Dependence of the thermal activation energy on the reverse bias voltage: 1 –  $E_a = kTg \alpha$  in the temperature range 129–343 К; 2 –  $E_a = E_g$ ; 3 –  $E_a = (E_g)/2$

При туннельном токопереносе ток через образец при обратном смещении можно найти как

$$I = eS \cdot \int_0^w n(x)\omega(x)dx. \quad (5)$$

Интегрирование происходит по ширине ОПЗ. Предположим, как в [2, 14], что скорость туннелирования одинакова во всех точках ОПЗ и равна максимальной скорости туннелирования. Тогда

$$I = eS \cdot \int_0^w n(x)\omega(x)dx \approx eSn\omega = eS \frac{g\omega N}{g + R + \omega}. \quad (6)$$

Вероятность туннелирования возрастает экспоненциально с ростом электрического поля, следовательно, переходы осуществляются в той области ОПЗ, где напряженность поля максимальна. При этом считаем, что потенциальный барьер имеет треугольную форму (см. рис. 4), тогда

$$\omega = \omega_0 \exp\left(-\frac{\alpha}{F}\right), \quad (7)$$

где  $F$  – напряженность электрического поля,  $\omega_0$ ,  $\alpha$  – постоянные.

При исследовании ВАХ при обратном смещении в нашем случае проводилась подсветка исследуемой структуры. Предположим, что в этом случае оптическая генерация преобладает над рекомбинационными и туннельными процессами, т.е.  $g \gg \omega + R$ . Тогда ток будет определяться выражением

$$I = eS\omega N = eSN\omega_0 \exp\left(-\frac{\alpha}{F}\right). \quad (8)$$

Решение задачи сводится к нахождению распределения напряженности электрического поля по ширине ОПЗ. Для этого рассматриваем уравнение Пуассона в виде

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0} \text{ или } \frac{dF}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0},$$

где  $\varphi = \varphi(x)$  – потенциал электрического поля внутри ОПЗ,  $F$  – напряженность электрического поля внутри ОПЗ (используется связь напряженности и потенциала электрического поля в одномерном случае  $F = -grad\varphi = -\frac{d\varphi}{dx}$ ),  $\rho = e(N_d - N_a + p - n)$  – плотность объемного заряда,  $e$  – заряд электрона,  $\varepsilon_0$  – относительная электрическая постоянная,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды,  $N_d$  ( $N_a$ ) – концентрация доноров (акцепторов).

По аналогии с [15] предположим, что концентрация носителей заряда одного типа значительно превосходит концентрацию носителей заряда другого типа (пусть  $N_d \gg (N_a)$  и  $p \ll n$ ). Тогда выражение для объемной плотности заряда примет вид  $\rho = e(N_d - n)$ . При этом в нашем случае мы не можем решать задачу в приближении обедненного слоя, так как происходит оптическая генерация свободных носителей заряда в КЯ при подсветке исследуемой структуры.

Предложен следующий алгоритм действия для определения концентрации подвижных и неподвижных носителей заряда в образце. По измеренным ВФХ при подсветке по [9] определялась концентрация свободных носителей как

$$n(x) = \frac{2}{e \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot S^2} \cdot \left[ \frac{d(C_6)}{dU} \right]^{-1} = -\frac{C_6^3}{e \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot S^2} \left( \frac{dC_6}{dU} \right)^{-1}. \quad (9)$$

где  $S$  – площадь  $p$ - $n$ -перехода,  $U$  – напряжение обратного смещения,  $C_6$  – барьерная емкость при обратном смещении.

Связь между измеренным профилем свободных носителей и профилем легирующей примеси определяется соотношением

$$N_d(x) = n(x) - \frac{kT}{e} \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{e} \frac{d}{dx} \left[ \frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx} \right]. \quad (10)$$

В данном выражении использовалась концентрация свободных носителей, определенная



по формуле (9) с использованием результатов измерения темновых ВФХ (без подсветки).

Погрешность формулы (10) гораздо сильнее зависит от погрешности измерения емкости, чем погрешность профиля (9). Расчеты [16] показали, что для получения приемлемых результатов по (10) относительная погрешность измерения емкости не должна превышать величины  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ . Точность установки, используемой для измерения ВФХ (см. рис. 1),  $\Delta C/C \sim 10^{-10}$ , следовательно, формула (10) применима для определения профиля распределения легирующей примеси в нашем случае.

Для подтверждения участия оптической генерации в КЯ в формировании экстремумов на обратной ветви ВАХ на рис. 6, а совмещены профиль легирующей примеси и ВАХ при обратном смещении и подсветке. На рис. 6, б приведен результат расчета напряженности электрического поля в ОПЗ с учетом найденных концентраций (9) и (10). Эта зависимость напряженности электрического поля от ширины ОПЗ использовалась для моделирования обратной ветви ВАХ при подсветке по (8), при этом постоянные  $\alpha$ ,  $\omega_0$  используются как подгоночные для выравнивания абсолютных значений тока измеренной и рассчитанной ВАХ (рис. 6, в).

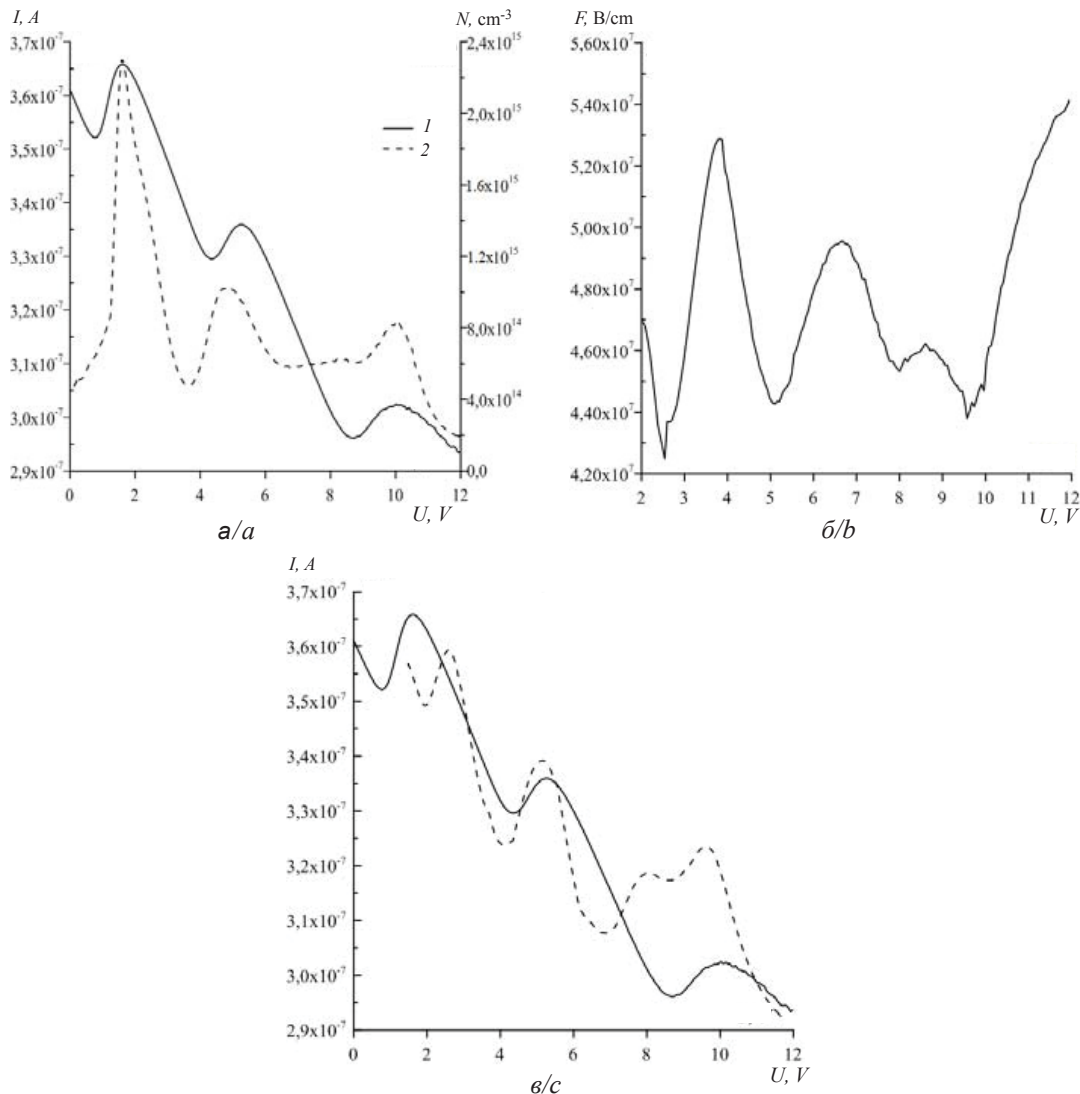


Рис. 6. Обратная ветвь ВАХ при подсветке (1) и профиль распределения легирующей примеси, рассчитанный по ВФХ (2) (а); зависимость напряженности электрического поля от напряжения обратного смещения (б); обратная ветвь ВАХ при подсветке для исследуемой структуры (сплошная линия – измеренная, пунктирная – рассчитанная по уравнению (8)) (в)

Fig. 6. Reverse current-voltage characteristic under illumination (1) and the distribution profile of the dopant calculated from the capacitance-voltage characteristics (2) (a); dependence of the electric field strength (b); reverse branch of the I V characteristic under illumination for the structure under study (solid line – measured, dashed line – calculated according to Eq. (8)) (c)



## Заключение

В работе рассматривался вопрос апробации применения обобщенной модели рекомбинации для описания обратной ветви ВАХ структур на основе InGaN/GaN при подсветке. Подсветка исследуемой структуры таким же СД приводит не только к увеличению обратного тока, но и к появлению максимумов на зависимости тока от напряжения обратного смещения. Количество максимумов на обратной ветви ВАХ совпадает с количеством КЯ, обнаруженных на профиле распределения легирующей примеси (см. рис. 6, а), рассчитанном по ВФХ при обратном смещении. Показано, что механизм, отвечающий за формирование ВАХ при обратном смещении в исследуемой структуре, – туннелирование. С учетом механизма токопереноса и преобладания процесса оптической генерации в КЯ при подсветке структуры таким же СД методом «стык-в-стык» получено выражение, которое позволило описать особенности, наблюдаемые на измеренной обратной ветви ВАХ (см. рис. 6, а, в). Визуальное расхождение формы особенностей можно связать с необходимостью использования в модели данных численного интегрирования и дифференцирования измеренных обратных ВФХ.

## Список литературы

1. Bougrov V., Levinshtein M. E., Rumyantsev S. L., Zubrilov A. Gallium Nitride (GaN) // *Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe* / eds. M. E. Levinshtein, S. L. Rumyantsev, M. S. Shur. New York : John Wiley & Sons, Inc., 2001. P. 1–30.
2. Булярский С. В., Грушко Н. С. Обобщенная модель рекомбинации в неоднородных полупроводниковых структурах // *ЖЭТФ*. 2000. Т. 118, № 11. С. 1222–1229.
3. Булярский С. В., Рудь Ю. В., Вострецова Л. Н., Кагарманов А. С., Трифонов О. А. Туннельная рекомбинация в наноразупорядоченных полупроводниковых структурах // *ФТП*. 2009. Т. 43, вып. 4. С. 460–466.
4. Wetzel C., Kasumi M., Detchprohm T., Takeuchi T., Amano H., Akasaki I. Discrete Stark-Like Ladder in Piezoelectric GaInN/GaN Quantum Wells // *Phys. Status Solidi Basic Res.* 2002. Vol. 216, № 1. P. 399–403.
5. Grushko N. S., Loginova E. A., Potanakhina L. N. Tunneling recombination in spatially inhomogeneous structures // *Semiconductors*. 2006. Vol. 40, № 5. P. 570–573.
6. Grushko N. S., Vostretsova L. N., Ambrosevich A. S., Kagarmenov A. S. Effect of temperature on luminance-current characteristics of the InGaN light-emitting diode's structure // *Semiconductors*. 2009. Vol. 43, № 10, P. 1356–1362.
7. Zhou R. L. (Zhou Renlin), Ikeda M. (Ikeda Masao), Zhang F. (Zhang Feng), Liu J. P. (Liu Jianping), Zhang S. M. (Zhang Shuming), Tian A. Q. (Tian Aiqin), Wen P. Y. (Wen Pengyan), Li D. Y. (Li Deyao), Zhang L. Q.

- (Zhang Liqun), Yang H. (Yang Hui). Total-InGaN-thickness dependent Shockley-Read-Hall recombination lifetime in InGaN quantum wells // *Journal of Applied Physics*. 2020. Vol. 127, iss. 1. Article number 013103.
8. Tao X. X. (Tao Xixia), Liu J. L. (Liu Junlin), Zhang J. L. (Zhang Jianli), Mo C. L. (Mo Chunlan), Xu L. Q. (Xu Longquan), Ding J. (Ding Jie), Wang G. X. (Wang Guangxu), Wang X. L. (Wang Xiaolan), Wu X. M. (Wu Xiaoming), Quan Z. J. (Quan Zhijue). Performance enhancement of yellow InGaN-based multiple-quantum-well light-emitting diodes grown on Si substrates by optimizing the InGaN/GaN superlattice interlayer // *Optical Materials Express*. 2018. Vol. 8, iss. 5. P. 1221–1230.
  9. Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М. : Радио и связь, 1985. 264 с.
  10. Барановский М. В., Глинский Г. Ф., Миронова М. С. Фотоэлектрический метод диагностики гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами // *ФТП*. 2013. Т. 47, вып. 1. С. 54–58.
  11. Булярский С. В., Вострецова Л. Н., Гаврилов С. А. Фотоприемники на основе CuInS<sub>2</sub> // *Физика и техника полупроводников*. 2016. Т. 50, № 1. С. 106–111.
  12. Грушко Н. С., Логинова Е. А., Потанахина Л. Н. Определение параметров рекомбинационных центров в пространственно неоднородных структурах // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2006. Т. 72, № 2. С. 25–29.
  13. Вострецова Л. Н., Амброзевич А. С., Кузнецова Т. Э. Вольт-амперные характеристики структур на основе InGaN/GaN при высоком уровне инжекции // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. 2019. № 2 (50). С. 75–86.
  14. Булярский С. В., Грушко Н. С. Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1995. 399 с.
  15. Зи С. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. М. : Мир, 1984. Кн. 1. 456 с.
  16. Каретникова И. Р., Нефедов Н. М., Шашкин В. И. О точности восстановления профиля легирования полупроводников на основе вольт-фарадных измерений в процессе электрохимического травления // *ФТП*. 2001. Т. 35, вып. 7. С. 801–807. <https://doi.org/10.1134/1.1385710>

## References

1. Bougrov V., Levinshtein M. E., Rumyantsev S. L., Zubrilov A. Gallium Nitride (GaN). In: M. E. Levinshtein, S. L. Rumyantsev, M. S. Shur, eds. *Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2001, pp. 1–30.
2. Bulyarsky S. V., Grushko N. S. Generalized model of recombination in inhomogeneous semiconductor structures. *J. of Exp. and Theor. Phys.*, 2000, vol. 91, iss. 5, pp. 1059–1065. <https://doi.org/10.1134/1.1334996>
3. Bulyarsky S. V., Rud' Yu. V., Vostretsova L. N., Kagarmenov A. S., Trifonov O. A. Tunneling recombination in nano-disordered semiconductor structures, *Semiconductors*, 2009, vol. 43, iss. 4, pp. 440–446.





4. Wetzel C., Kasumi M., Detchprohm T., Takeuchi T., Amano H., Akasaki I. Discrete Stark-Like Ladder in Piezoelectric GaInN/GaN Quantum Wells. *Phys. Status Solidi Basic Res.*, 2002, vol. 216, no. 1, pp. 399–403.
5. Grushko N. S., Loginova E. A., Potanakhina L. N. Tunneling recombination in spatially inhomogeneous structures. *Semiconductors*, 2006, vol. 40, no. 5, pp. 570–573.
6. Grushko N. S., Vostretsova L. N., Ambrosevich A. S., Kagarmanov A. S. Effect of temperature on luminance-current characteristics of the InGaN light-emitting diode's structure. *Semiconductors*, 2009, vol. 43, no. 10, pp. 1356–1362.
7. Zhou R. L. (Zhou Renlin), Ikeda M. (Ikeda Masao), Zhang F. (Zhang Feng), Liu J. P. (Liu Jianping), Zhang S. M. (Zhang Shuming), Tian A. Q. (Tian Aiqin), Wen P. Y. (Wen Pengyan), Li D. Y. (Li Deyao), Zhang L. Q. (Zhang Liqun), Yang H. (Yang Hui). Total-InGaN-thickness dependent Shockley-Read-Hall recombination lifetime in InGaN quantum wells. *Journal of Applied Physics*, 2020, vol. 127, iss. 1, article number 013103.
8. Tao X. X. (Tao Xixia), Liu J. L. (Liu Junlin), Zhang J. L. (Zhang Jianli), Mo C. L. (Mo Chunlan), Xu L. Q. (Xu Longquan), Ding J. (Ding Jie), Wang G. X. (Wang Guangxu), Wang X. L. (Wang Xiaolan), Wu X. M. (Wu Xiaoming), Quan Z. J. (Quan Zhijue). Performance enhancement of yellow InGaN-based multiple-quantum-well light-emitting diodes grown on Si substrates by optimizing the InGaN/GaN superlattice interlayer. *Optical Materials Express*, 2018, vol. 8, iss. 5, pp. 1221–1230.
9. Batavin V. V., Kontsevov Yu. A., Fedorovich Yu. V. *Measurement of Parameters of Semiconductor Materials and Structures*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 264 p. (in Russian).
10. Baranovskiy M. V., Glinskii G. F., Mironova M. S. Photoelectric diagnostics method for InGaN/GaN multiple-quantum-well heterostructures. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, no. 1, pp. 58–62. <https://doi.org/10.1134/S1063782613010053>
11. Bulyarskiy S. V., Vostretsova L. N., Gavrilov S. A. Photodetectors based on CuInS<sub>2</sub>. *Semiconductors*, 2016, vol. 50, iss. 1, pp. 106–111.
12. Grushko N. S., Loginova E. A., Potanakhina L. N. Determination of the parameters of recombination centers in spatially inhomogeneous structures. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Zavod. Diagnostics of Materials], 2006, vol. 72, no. 2, pp. 25–29 (in Russian).
13. Vostretsova L. N., Ambrosevich A. S., Kuznetsova T. E. Current-voltage characteristics of structures based on InGaN / GaN at a high level of injection. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Volga Region. Physical and Mathematical Sciences*, 2019, no. 2 (50), pp. 75–86 (in Russian).
14. Bulyarskiy S. V., Grushko N. S. *Generation-recombination Processes in Active Elements*. Moscow, Moscow University Press, 1995. 399 p. (in Russian).
15. Zi S. *Physics of Semiconductor Devices: in 2 books*. Moscow, Mir Publ., 1984. Book 1. 456 p. (in Russian).
16. Karetnikova I. R., Nefedov I. M., Shashkin V. I. The accuracy of reconstructing the semiconductor doping profile from capacitance-voltage characteristics measured during electrochemical etching. *Semiconductors*, 2001, vol. 35, iss. 7, pp. 766–772. <https://doi.org/10.1134/1.1385710>

Поступила в редакцию 16.08.2021, после рецензирования 07.09.2021, принята к публикации 15.09.2021  
Received 16.08.2021, revised 07.09.2021, accepted 15.09.2021