

УДК 621.315.592

## Влияние длительного протекания прямого тока на электрические характеристики светодиодов на основе InGaN

В.Д. Рисованный, В.В. Светухин, Д.Я. Вострецов,  
Л.Н. Вострецова, А.С. Амброзевич, М.С. Ермаков

*В работе исследуются изменение вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик характеристики светодиодов синего свечения с модулированным и однородным легированием на основе GaN и его твердых растворов при наработке 0 – 750 часов. Установлен различный механизм изменения электрических и оптических свойств исследуемых структур в зависимости от вида легирования. Определены параметры уровня, участвующего в создании туннельного потока.*

PACS: 72.20.-i; 72.20.Jv; 73.63.-b

*Ключевые слова:* светодиоды, деградация, рекомбинация, туннелирование, яркость.

### Введение

Полупроводниковые приборы на основе InGaN и GaN обладают широким диапазоном рабочих температур, служат основой для устройств высокотемпературной оптоэлектроники, обладают высокой яркостью и всепогодным исполнением, применяются в устройствах с меняющейся информацией, а также в системах атмосферной оптической связи, охранных системах [1–3]. Преимуществом таких светодиодных (СД) осветительных приборов является малое потребление энергии, малое тепловыделение, вибростойкость, отсутствие специальных патронов, достаточная гамма излучения, высокая долго-

вечность. СД синего свечения используются для получения прибора белого свечения. По сравнению с лампами накаливания светодиоды способны обеспечить более высокий квантовый выход и долговременную стабильность [4–5]. Однако процессы деградации продолжают оставаться важной проблемой для светодиодов.

Исследованию процессов деградации светоизлучающих диодов (СИД) на основе гетероструктур посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ [6–8]. В работе [6] представлены результаты экспериментальных исследований деградации вольт-амперных (ВАХ) и ватт-амперных характеристик СД на основе гетероструктур InGaN на SiC при длительном воздействии электрической нагрузки. Установлено, что заметная деградация ВАХ в области микро-токов начинается в первые 100 часов работы под нагрузкой, причем обнаружено появление неустойчивости в области контактов. Процесс деградации контактного соединения приводил, в конечном итоге, к полному отказу СД.

В [7] исследовались синие светодиоды с InGaN/GaN- квантовой ямой, через которые в течение нескольких часов пропускались токовые импульсы. После деградации синих InGaN/GaN СД, ускоренной токовыми им-

Рисованный В.Д., ведущий научный сотрудник.

Светухин В.В., директор.

Научно-исследовательский технологический институт  
Ульяновского государственного университета.

Россия, 432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42.

E-mail: dimka97@mail.ru

Вострецов Д.Я., доцент.

Вострецова Л.Н., старший преподаватель.

Амброзевич А.С., доцент

Ермаков М.С., ассистент

Ульяновский государственный университет.

Россия, 432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2012 г.

© В.Д. Рисованный, В.В. Светухин, Д.Я. Вострецов,  
Л.Н. Вострецова, А.С. Амброзевич, М.С. Ермаков,  
2013

пульсами амплитудой до 50 мА, наблюдались нестабильные утечки прямого тока. В режиме коротких импульсов обнаружена задержка в распределении интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) по площади, а при увеличении длительности импульсов – темные участки вблизи  $p$ -контактных площадок. Изменение относительной яркости с напряжением в участках под  $p$ -контактом в рабочем светодиоде вызвано повышением плотности отрицательно заряженных акцепторных граничных состояний.

В [8] исследовалось изменение люминесцентных и электрических характеристик СД на основе InGaN при длительной работе. Обнаружено две стадии старения исследуемых структур, связанные с активацией акцепторов магния и образованием донорных вакансий.

В данной работе исследовались изменения ВАХ, ВФХ и ампер-яркостных характеристик структур на основе InGaN синего свечения.

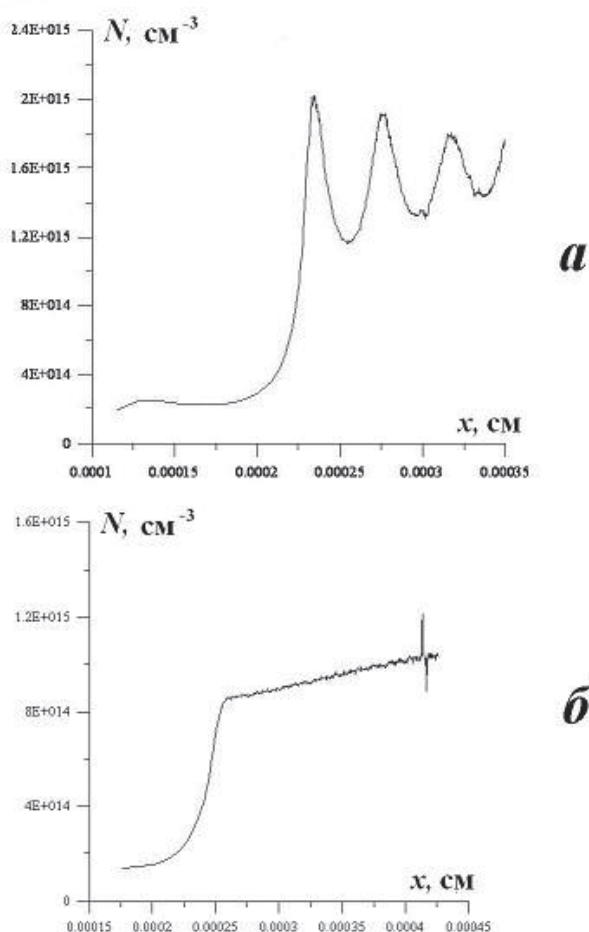


Рис. 1. Профиль легирующей примеси для структуры:  
 а) с модулированным легированием;  
 б) с однородным легированием

### Исследование процесса деградации структур с однородным и модулированным легированием на основе InGaN/GaN

Эксперимент проводился на СД Hewlett Packard синего свечения на основе твердого раствора InGaN. Исследовалось две группы образцов. Деление образцов на группы проведено по виду профиля распределения легирующей примеси, а именно, с однородным и модулированным легированием активной области. На рис. 1 приведен профиль легирования исследуемых структур, определенный по методике [9–11].

Эксперимент показал, что изменение оптических и электрических характеристик исследуемых структур различно.

В случае модулированного легирования квантовой ямы наблюдается уменьшение яркости свечения образцов по мере увеличения времени наработки на прямом токе 30 мА. При этом на ВАХ наблюдается увеличение туннельной составляющей тока (рис. 2, а).

В работе [12] показано, что туннельная составляющая в неоднородных полупроводниковых структурах описывается выражением

$$I_r = \frac{kT}{U_k - U} S d(U) f N^2 \quad (1),$$

где  $\omega$  – вероятность туннелирования через потенциального барьера,  $N$  – концентрация глубоких уровней,  $S$  – площадь  $p$ - $n$ -перехода,  $d$  – ширина области пространственного заряда (ОПЗ), определяемая из ВФХ структур,  $U_k$  – контактная разность потенциалов,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура.

Из (1) можно получить выражения для тока в структуре с квантовой ямой (КЯ), если учесть, что вероятность туннелирования в таких структурах описывается выражением [13]:

$$\omega(U) = \omega_0 \exp(\gamma U) \quad (2),$$

где  $\omega_0$  – постоянная, характеризующая туннельную прозрачность потенциального

барьера,  $\gamma \sim \sqrt{\frac{N_d}{N_a}}$ .

В выражении (2) используется вероятность туннелирования, отнесенная к единичной концентрации состояний  $N$ , по которым идет перенос [14]:

$$\omega(U) \rightarrow \frac{\omega(U)}{N} \quad (3)$$

Тогда:

$$I_r = \frac{kT}{U_k - U} Sd(U) \omega_0 N \exp(\gamma U) \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что увеличение туннельной составляющей связано с увеличением концентрации глубоких центров, отвечающих за безызлучательную рекомбинацию.

В работе [15] предложен метод определения энергии уровня, участвующего в создании туннельной составляющей ВАХ, по зависимости приведенной скорости рекомбинации  $R_{np} = f(U)$  (рис. 3).

$$R_{np} = \frac{ax}{x^2 + bx + d}$$

$$a = \frac{\omega N^2}{n_i}; b = \frac{n_1}{n_i} + \frac{2\omega N}{n_i c}; d = \frac{\omega N n_1}{c n_i^2}$$

Из условия максимума функции  $\frac{\partial R_{np}}{\partial x} = 0$  находим, что  $d = x_{\max}^2$ . Выбирая две точки на зависимости  $R_{np}(U)$  вблизи максимума, мы получаем уравнение для нахождения  $b$ :

$$K = \frac{R_{np1}}{R_{np2}} = \frac{x_1 (x_2^2 + b x_2 + d)}{x_2 (x_1^2 + b x_1 + d)} \quad (5).$$

Зная  $b$  и  $d$ , из (5) определяем отношение  $n_1/n_i$ :

$$Y = \frac{n_1}{n_i} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 8d}}{2} \quad (6).$$

С учетом (6) из  $d$  определяем коэффициент захвата уровня, а из выражения для  $Y$  – положение уровня:

$$c = \frac{\omega N Y}{d n_i} \quad (7)$$

$$E_i = -kT \ln \left( \frac{Y n_i}{N_c} \right) \quad (8).$$

По положению максимума на зависимости  $R_{np} = f(U)$  выражения (8) были определены энергия уровня и его коэффициент захвата:  $E = 0,9$  эВ,  $c = 0,72 \times 10^{-12}$  см<sup>3</sup>/с.

Анализ зависимости  $R_{np} = f(U)$  при разных временах наработки показал, что в процессе деградации не изменяется энергия глубокого центра и его коэффициент захвата. Зна-

чение приведенной скорости рекомбинации в максимуме пропорционально величине  $\frac{\sqrt{\tilde{n}_n \tilde{n}_p}}{2} N_i$ . Следовательно, увеличение тун-

нельного тока и, как следствие, возрастание амплитуды максимума зависимости приведенной скорости рекомбинации от напряжения связано с увеличением концентрации глубоких центров, ответственных за безызлучательную рекомбинацию.

Так, у структур с однородным легированием активной области наблюдается уменьшение туннельной составляющей на начальном этапе наработки (0-750 часов). ВАХ исследуемых структур при разном времени наработки приведены на рис. 2, б

Из формулы (1) видно, что уменьшение туннельной составляющей связано с уменьшением концентрации глубоких центров (возможно упорядочивание границы раздела In-

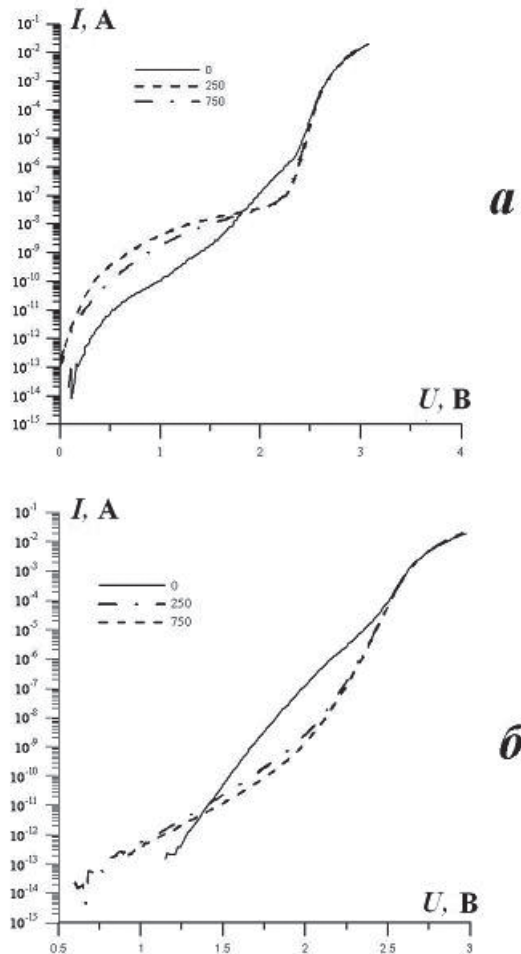


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики исследуемых структур: а) с модулированным легированием; б) с однородным легированием.

GaN/GaN), отвечающих за безызлучательную рекомбинацию.

На концентрационных профилях структур с однородным легированием наблюдается увеличение максимума профиля на границе с активной областью (квантовой ямой). Подобное поведение профилей заряженной примеси наблюдалось в работе [16] и связано с активацией акцепторных центров Mg при разрушении комплексов Mg-H.

### Заключение

В ходе проведенных исследований обнаружено

– В случае модулированного легирования квантовой ямы наблюдается уменьшение яркости свечения образцов по мере увеличения времени наработки на прямом токе 30 мА.

– В случае однородного легирования квантовой ямы наблюдается увеличение яркости СД на протяжении 750 часов наработки. Уменьшение туннельной составляющей связано с уменьшением концентрации глубоких центров (возможно упорядочивание границы раздела InGaN/GaN), отвечающих за безызлучательную рекомбинацию.

– На концентрационных профилях структур с однородным легированием наблюдается увеличение максимума профиля на границе с активной областью (квантовой ямой), которое и связано с активацией акцепторных центров Mg при разрушении комплексов Mg-H.

– Установлено, что в случае однородного легирования квантовой ямы наблюдается

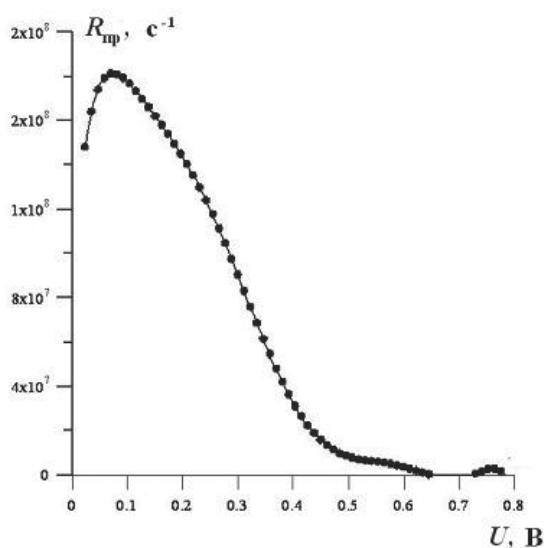


Рис. 3. Приведенная скорость рекомбинации при 250 часах наработки

уменьшение яркости свечения образцов по мере увеличения времени наработки на прямом токе 30 мА. При этом на ВАХ наблюдается увеличение туннельной составляющей тока. Туннельная составляющая в неоднородных полупроводниковых структурах пропорциональна концентрации глубоких уровней, вероятности туннелирования через потенциальный барьер, а также определяется зависимостью вероятности туннелирования от приложенного напряжения. Увеличение туннельной составляющей связано с увеличением концентрации глубоких центров, отвечающих за безызлучательную рекомбинацию.

– Для определения энергии уровня, участвующего в создании туннельной составляющей ВАХ использовался метод по зависимости приведенной скорости рекомбинации от напряжения. По положению максимума на зависимости были определены энергия уровня и его коэффициент захвата:  $E = 0,9$  эВ,  $c = 0,72 \times 10^{-12}$  см<sup>3</sup>/с.

*Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.*

### Литература

1. Полищук А., Туркин А. // Энергосбережение. 2008. № 2. С. 8
2. Гужов С., Полищук А. // СТА. 2008. № 1. С. 14
3. Туркин А., Аверин Е. // Энерго Style. 2009. № 1. С. 10
4. Грушко Н.С., Хайрулина А.С. Параметры белых светодиодов InGaN/AlGaN/GaN: светоотдача, КПД, координаты цветности / Опто-наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды X международной конференции. – Ульяновск, 2008.
5. Гридин В.Н., Рыжиков И.В., Виноградов В.С., Щербаков В.Н. // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32. № 4. С. 375
6. Ефремов А.А., Бочкарева Н.И., Горбунов Р.И. и др. // ФТП. 2006. Т. 40. № 5. С. 621
7. Бочкарева Н.И., Ефремов А.А., Ребане Ю.Т. и др. // ФТП. 2006. Т. 40. № 1. С. 122
8. Полищук А., Туркин А. // Компьютеры и технологии. 2008. № 2. С. 25
9. Берман Л.С. Ёмкостные методы исследования полупроводников. – Л.: Наука, 1972.

10. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. – М.: Радио и связь. 1985

11. Каретникова И.Р., Нефедов Н.М., Шашкин В.И. // ФТП. 2001. Т. 35. № 7. С. 801

12. Грушко Н.С., Лакалин А.В., Евстигнеева Е.А. // Известия вузов. Электроника. 2002. № 3. С. 48

13. Грушко Н.С., Лакалин А.В., Евстигнеева Е.А. // Ученые записки Ульяновского государственного университета. Серия Физическая. 2001. № 2(11). С. 34

14. Булярский С.В., Ионычев В.К., Кузьмин В.В. // ФТП. 1997. Т. 37. № 1. С. 117

15. Грушко Н.С., Логинова Е.А., Потанихина Л.Н. // ФТП. 2006. Т. 40. № 5. С. 584

16. Ковалев А.Н., Маняхин Ф.И., Кудряшов В.Е. и др. // ФТП. 1999. Т. 33. № 2. С. 224

17. Ковалев А.Н., Маняхин Ф.И., Кудряшов В.Е. и др. // ФТП. 1999. Т. 33. № 2. С. 224

## Influence of a long-term direct current on the electrical features of light-emitting InGaN diodes

*V.D. Risovanyi, V.V. Svetukhin, D.Ya. Vostrensov,  
L.N. Vostretsova, A.C. Ambrozevich, and M.S. Ermakov*

*The results of research of a long-term direct current influence on the electrical features of light-emitting InGaN diodes are presented at the article.*

*PACS: 72.20.-i; 72.20.Jv; 73.63.-b*

*Keywords: light-emitting diodes, degradation, recombination, tunneling, brightness.*

*Bibliography – 16 references*

*Received November 30, 2012*