

# Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 621.315.592

## Влияние $\gamma$ -облучения на электрофизические параметры светодиодов на основе InGaN/GaN

Н. С. Грушко, А. П. Солонин

*Проведено исследование светодиодов InGaN/AlGaIn/GaN на стандартной подложке SiC [KPT-1608 PBC (SMD)] с двумя квантовыми ямами и активным слоем  $In_xGa_{1-x}N$  с  $x = 0,21$ . Установлено влияние  $\gamma$ -облучения на концентрационный профиль мелкой примеси и концентрацию глубоких уровней. Определены величина компенсированной области и градиента концентрации. Выявлена возможность увеличения КПД светодиода и его яркости.*

PACS: 73.40.Kp, 73.63.Hs, 78.55.Cr, 78.90.+t, 85.60.Jb

*Ключевые слова:* светодиоды, квантовые ямы, концентрационный профиль, квантовый выход.

### Введение

Основными характеристиками светодиодов (СД) являются яркость свечения и квантовый выход. За последние годы достигнуты значения внешнего квантового выхода  $\eta$  на уровне 18 % для синего и 20 % для зеленого свечения. Срок службы составляет более  $10^5$  ч для диодов на основе GaN [1]. Приведенные результаты достигнуты на  $p$ - и  $n$ -гетероструктурах типа InGaN/AlGaIn/GaN с квантовыми ямами (КЯ). При этом мировая экономика продолжает ставить задачи еще большего повышения эффективности светодиодных приборов в интересах перспективного перехода на светодиодное освещение.

Цель данной работы — изучение влияния  $\gamma$ -облучения на ряд электрофизических характеристик СД, а именно, на концентрационные профили и КПД СД.

### Образцы для исследования

В работе исследовались сверхяркие СД модели KPT-1608 PBC (SMD), производителем которых является фирма King Bright. СД созданы на основе гетероструктур AlGaIn/InGaIn/GaN на стандартной подложке SiC с содержанием молекулярной доли In ~ 21 %.

В образцах имеются две КЯ. Максимум в спектре электролюминесценции (ЭЛ) при комнатной температуре соответствует энергии кванта 2,59 эВ. В этих СД обнаружены уровни 0,64; 0,76 и 0,83 эВ из измерений термостимулированной емкости (TSE) и 0,73 эВ из спектров DLTS [2]. Определен максимальный квантовый выход на уровне 8 % [3].

В данной работе измерялись непосредственно вольт-фарадные характеристики (ВФХ) и определялись профили мелкой примеси, а также концентрация глубоких уровней для образцов без облучения и с облучением  $\gamma$ -квантами с дозой 0,3 и 0,5 Мрад. Одновременно измерялись яркостные характеристики и рассчитывался КПД.

### Профили мелкой примеси. Определение величины компенсированной области и градиента концентрации

Изменение общей емкости структуры  $C$  при  $\gamma$ -облучении связано со сдвигом области пространственного заряда (ОПЗ) и концентрационного профиля в менее легированной области  $p$ -типа (AlGaIn:Mg) к поверхности образца. Введение больших концентраций In в активную область структур затрудняет сильное Mg-легирование  $p$ -областей и способствует образованию компенсированных областей, прилегающих к активному слою InGaIn. У нас, следовательно, образуется структура типа  $p$ - $i$ - $n$  с компенсированным  $i$ -слоем.

На рис. 1 представлен концентрационный профиль  $N = f(x)$ , рассчитанный по нижеприведенной формуле в соответствии с методикой [4]:

$$N = \frac{2}{q\epsilon\epsilon_0 S^2} \frac{1}{[d(1/C^2)/dU]}. \quad (1)$$

Грушко Наталья Сергеевна, профессор.  
Солонин Александр Павлович, ведущий инженер.  
Ульяновский государственный университет.  
Россия, 432000, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42.  
Тел. (8422) 73-00-67. E-mail: hatabovich@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2010 г.

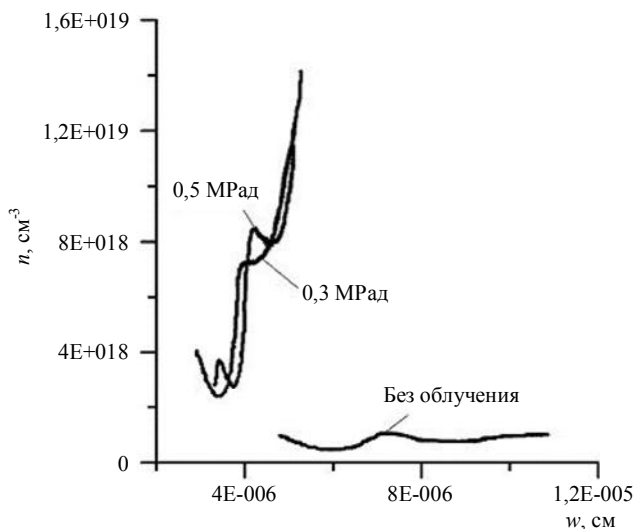


Рис. 1. Концентрационные профили светодиода InGaN/GaN для различных доз облучения

Наблюдается увеличение концентрации мелкой примеси (при дозе 0,3 МРад) по сравнению с образцами до  $\gamma$ -облучения и компенсация ее после увеличения дозы (0,5 МРад). Это подтверждают вольт-амперные характеристики (ВАХ), в которых ток больше при дозе 0,3 МРад по сравнению с необлученными образцами. После компенсации ток уменьшается.

Воздействие  $\gamma$ -излучения на СД можно разделить на две стадии: на первой (малые дозы) происходит деактивация Mg в *p*-слое путем разрушения его связи с остаточным водородом и соответствующее увеличение эффективной концентрации акцепторов; на второй (большие дозы) — образование точечных дефектов типа пар Френкеля (вероятно, смещение из узлов решетки атомов азота N и образование  $V_N$ -доноров).

Таким образом, в нашем случае происходит самокомпенсация ( $V_{Ga}$ -акцепторы,  $V_N$  и  $(V_N - V_{Ga})$  — одно- и двухзарядные доноры компенсируют основную примесь Mg).

По методике [5] определены величина компенсированной области  $L$  (см) и градиент концентрации  $a$  (с размерностью  $см^{-4}$ ). Вводя параметр  $y(U) = [d(1/C(U))/dU]^{-2}$  и зная  $U_k$ , строим зависимость  $1/C = f(U_k - U)^{1/2}$ , по которой определяем  $(1/C)|_{U=0}$ . Ширина компенсированного слоя вычисляется по формуле:  $L = \epsilon\epsilon_0 S / C(0)$ , где  $S$  — площадь *p-n*-перехода. Градиент концентрации  $a$  определяем по формуле:  $a = 2 \operatorname{tg} \alpha / q S^2 \epsilon\epsilon_0 L$ , где  $\operatorname{tg} \alpha$  — угол наклона функции  $y = f(U)$ .

В таблице приведены параметры материала, полученные из *C-U*-характеристик.

Параметры компенсированной области

Доза, МРад	$U_k$ , В	$L$ , см	$a$ , $см^{-4}$
0	1,07	$1,16 \cdot 10^{-5}$	$2,79 \cdot 10^{24}$
0,3	1,07	$3,57 \cdot 10^{-6}$	$7,54 \cdot 10^{25}$
0,5	1,07	$3,84 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{26}$

Воздействие  $\gamma$ -облучения приводит к сдвигу концентрационного профиля к поверхности образца и сужению КЯ. Сдвиг профиля к поверхности происходит из-за изменения величины компенсированного слоя под воздействием  $\gamma$ -облучения, который уменьшается от  $1,16 \cdot 10^{-5}$  см (0 МРад) до  $3,57 \cdot 10^{-6}$  см (0,3 МРад), а затем несколько возрастает  $3,84 \cdot 10^{-6}$  см (0,5 МРад).

Известно, что существует сильная зависимость формы КЯ от смещения. Форма КЯ изменяется пьезоэлектрическими полями. Флуктуации ширины КЯ определяются шероховатостью поверхности гетерограниц.

Аналогично работе [6], в которой изучалось усиление ЭЛ кристаллов ZnSe (Te, O) после  $\gamma$ -облучения, можно считать, что в нашем случае происходит повышение концентрации дефектов вакансионного типа  $V_{Ga}$ , обусловленное более высокой подвижностью межузельного атома Ga, мигрирующего к поверхности.

Наличие дефектов  $V_{Ga}$  и  $V_{Al}$  и дефектов замещения  $N_{Ga}^+$  и  $N_{Al}^+$ , соответственно, в GaN и AlN дает возможность для возникновения комплексов  $[N_{Ga}V_N]$  в GaN и  $[N_{Al}V_N]$  в AlN.

### Концентрация глубокой примеси

Кроме изменения мелких центров, определенных из *C-U*-характеристик, при облучении  $\gamma$ -квантами меняется концентрация глубоких центров, определенных по методике [7]. Вероятность туннелирования определяется формулой:  $\omega = \nu \exp(-2N^{-1/3}/a)$ , где  $a$  — радиус локализации,  $N$  — концентрация глубоких уровней,  $\nu$  — частота попыток преодоления потенциального барьера, которая равна частоте характеристического фонона. Концентрации глубоких уровней с увеличением дозы  $\gamma$ -облучения (0; 0,3; 0,5 МРад) уменьшается, но с увеличением напряжения  $N_{гн} = f(U)$  растет. Вероятность туннелирования с увеличением дозы уменьшается. Плотность состояний  $g(\mu)$  изменяется при  $\gamma$ -облучении. В области напряжений 1,5—2,5 В она падает с увеличением дозы и увеличивается в области 1—1,5 В, т. е. происходит сдвиг к поверхности. Это связано с облучением дозой 0,3 МРад. При дозе 0,5 МРад кривая  $g(\mu) = f(U)$  уже, чем при 0,3 МРад, и максимум смещен в сторону больших напряжений.

### Влияние $\gamma$ -излучения на квантовый выход

На рис. 2 представлена зависимость яркости  $B = f(I)$  и квантового выхода  $\eta = f(I)$  от тока  $I$  для разных доз облучения. Внешний квантовый выход  $\eta$  определяем по формуле (2), взятой из работы [8], как отношение числа внешних фотонов  $N^\Phi$  к числу прошедших через  $p$ - $n$ -переход носителей заряда  $N^L$

$$\eta = N^\Phi / N^L = \frac{E_\Sigma / h\nu}{It/e} = (\Phi te) / (It h\nu) = (L\Omega S) / (1625 \int_{E_1}^{E_2} J(E) f_E dE), \quad (2)$$

где  $E_\Sigma$  — суммарная энергия излучения СД;  
 $h\nu$  — энергия одного фотона;  
 $I$  — ток, протекающий через  $p$ - $n$ -переход;  
 $t$  — время;  
 $e$  — заряд электрона;  
 $\Phi$  — поток энергии излучения, Вт;  
 $J(E)$  — спектр излучения СД;  
 $f_E$  — энергетическая зависимость функции видности, причем

$$\int_{E_1}^{E_2} J(E) f_E dE = 1.$$

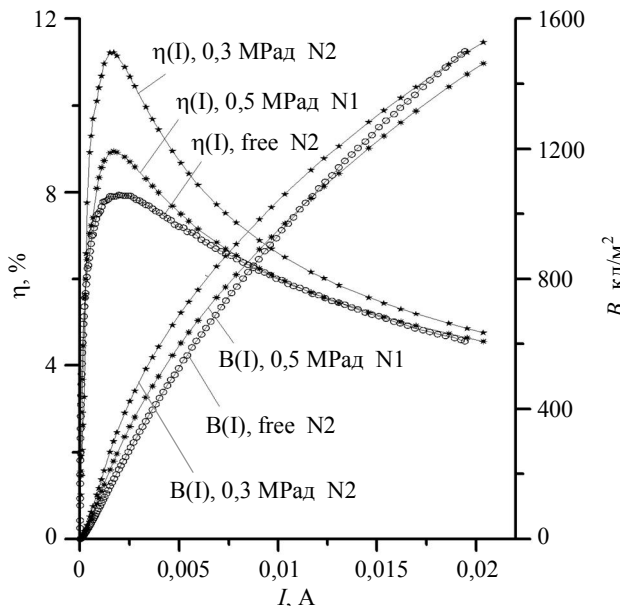


Рис. 2. Зависимость яркости  $B$  и квантового выхода  $\eta$  от тока  $I$  для разных доз облучения

Кроме того, в формуле (2)  $E_1$  и  $E_2$  — минимальное и максимальное значение энергии излучаемых фотонов, эВ.

Для исключения потерь измерения проводились "встык". СД располагался вплотную к приемнику излучения, т. е. его телесный угол  $\Omega = 2\pi$ .

В работе [8] это было ранее представлено для необлученных образцов.

Объяснение поведения  $\eta$  и  $B$  от тока приведено в работе [9]. Из рис. 2 видно, что зависимость  $\eta = f(I)$  имеет немонотонный характер. Эффективность излучения растет и достигает максимума при токе 1—3 мА. При дозе 0,3 МРад в максимуме  $\eta = 11\%$ ; при дозе 0,5 МРад имеем  $\eta = 9\%$  и, наконец, в образце без облучения  $\eta = 8\%$ . Таким образом, в образце при дозе 0,3 МРад произошло увеличение эффективности излучения в 1,4 раза.

На ампер-яркостной характеристике (АЯХ) можно выделить несколько наклонов ( $n = 1,44; 1,18; 0,8$  — для необлученного образца); ( $n = 1,8; 1,26; 0,6$  — для дозы 0,3 МРад) и ( $n = 1,73; 1,2; 0,7$  — для дозы 0,5 МРад). Первый наклон при малых токах характеризует инжекцию, и он максимален при дозе 0,3 МРад. Следующий участок близок к линейному, что соответствует постоянному внутреннему квантовому выходу. Оба канала рекомбинации (излучательный и безызлучательный) характеризуются постоянным временем жизни. В этой области токов наблюдается максимум на зависимости  $\eta = f(I)$ . При малых дозах  $\gamma$ -облучения (0,3 МРад) из-за радиационно-стимулированной твердофазной перекристаллизации может изменяться  $\Delta E_g$  [6]. С увеличением дозы доля кристаллофазы уменьшается из-за накопления точечных дефектов.

Уменьшение КПД, видимо, происходит из-за нескольких факторов: более быстрого роста безызлучательной рекомбинации с увеличением тока через образец, из-за утечек в более широкозонную область (GaN), из-за падения напряжения на компенсированном слое при дальнейшем увеличении тока. Замедляется понижение потенциального барьера, что ограничивает инжекцию носителей в активную область. Увеличивается доля носителей заряда, способных переходить в неосновную долину GaN. Эти носители рекомбинируют с участием фононов, что снижает эффективность излучения.

### Выводы

1.  $\gamma$ -облучение изменяет концентрационный профиль, сдвигая его к поверхности, что связано с изменением величины компенсированного слоя. Изменяется ширина КЯ.

2.  $\gamma$ -облучение приводит к уменьшению концентрации глубоких центров.

3. Наблюдается увеличение КПД СД при малых дозах  $\gamma$ -облучения. Увеличивается интенсивность полосы ЭЛ, что объясняется структурным упорядочением границы раздела InGaN/GaN (аналогично эффекту в работе [10] для структур Si/SiO<sub>2</sub>).

В результате такого упорядочения снижается концентрация безызлучательных рекомбинационных центров и, следовательно, возрастает светимость. При высоких дозах облучения интенсивность ЭЛ уменьшается, что связано с интенсивной генерацией поверхностных радиационных дефектов (межузельный Ga<sub>i</sub> мигрирует к поверхности). По-видимому, при переходе к дозе 0,5 МРад главную роль играет канал безызлучательной рекомбинации с малой энергией активации через дефекты, расположенные вблизи квантовых точек [11], поэтому КПД и интенсивность электролюминесценции падает.

### Л и т е р а т у р а

1. Mukai T., Yamada M., Nakamura S.// Jpn. J. Appl. Phys. 1999. V. 38. P. 3976—3981.
2. Амброзевич С. А., Лакалин А. В., Солонин А. П. Вольт-емкостные исследования светодиодов на основе гетероструктуры InGaN/GaN// Ученые записки УлГУ. Сер. физическая. 2005. Вып. 1(17). С. 54—58.
3. Грушко Н. С., Лакалин А. В., Солонин А. П. Яркость голубых светодиодов на основе GaN// Неорганические материалы. 2008. Т. 44. № 2. С. 181—183.
4. Берман Л. С. Емкостные методы исследования полупроводников. — Л.: Наука, 1972.
5. Грушко Н. С., Потанахина Л. Н. Вольт-фарадные характеристики структур на основе твердого раствора InGaN// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 2. С. 45—50.
6. Эльмуратова Д. Б., Ибрагимова Э. М. Усиление электролюминесценции кристаллов ZnSe(Te, O) после  $\gamma$ -облучения// ФТП. 2007. Т. 41. Вып. 10. С. 1153—1157.
7. Грушко Н. С., Дуванова Н. В., Логинова Е. А. Структуры InGaN/SiC с модулированным легированием// Ученые записки УлГУ. Сер. физическая. 2004. Вып. 1(16). С. 30—39.
8. Грушко Н. С., Солонин А. П. Эффективность излучения голубых светодиодов на основе InGaN/GaN// Тр. Междунар. конф. "Опто-наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы". — Ульяновск, 2006. С. 206.
9. Грушко Н. С., Потанахина Л. Н. Спектры электролюминесценции и коэффициент полезного действия светодиодов на основе твердого раствора InGaN// Прикладная физика. 2007. № 6. С. 5—8.
10. Лисовский И. П., Индутный И. З. и др. Усиление фотолюминесценции структур с нанокристаллическим кремнием, стимулированное низкодозовым  $\gamma$ -облучением// ФТП. 2008. Т. 42. № 5. С. 591—594.
11. Сизов В. С., Гуткин А. А. и др. Фазовый распад и безызлучательная рекомбинация носителей в активных областях светоизлучательных приборов на основе квантовых точек InGaN в матрице GaN или AlGaIn// ФТП. 2009. Т. 43. № 6. С. 836—840.

## Influence of $\gamma$ -irradiations on electrophysical parameters of the InGaN/GaN light-emitting diodes

*N. S. Grushko, A. P. Solonin*

Ulyanovsk State University, 42 Lev Tolstoy str., Ulyanovsk, 432000, Russia

E-mail: hatabovich@mail.ru

***The InGaN/AlGaIn/GaN LEDs were investigated after  $\gamma$ -irradiation. The influence is established on a concentration profile of a fine impurity and concentration of deep levels. The size of the compensated area and a gradient of concentration are determined. The opportunity of increase of efficiency of LEDs and its brightnesses is revealed.***

PACS: 73.40.Kp, 73.63.Hs, 78.55.Cr, 78.90.+t, 85.60.Jb

*Keywords:* light-emitting diodes, quantum wells, concentration profile, quantum exit.

Bibliography — 11 references.

Received February 25, 2010