

УДК 621.382:539.12.04

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ GaN И GaAs ДИОДОВ ПРИ n-γ-ОБЛУЧЕНИИ© 2012 г. **В.П. Шукайло¹, С.В. Оболенский², Н.В. Басаргина¹, И.В. Ворожцова¹,
С.М. Дубровских¹, О.В. Ткачёв¹**¹ РФЯЦ–ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск² Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

dep5@vniitf.ru

Поступила в редакцию 26.06.2012

Выполнены исследования фото- и электролюминесценции GaN и GaAs светодиодов в момент воздействия импульса n-γ-излучения. Показано, что при воздействии ионизирующего излучения с мощностью экспозиционной дозы $\sim 10^8$ P/c для диодов GaN и $\sim 10^7$ P/c для диодов на основе GaAs наблюдается фотолюминесценция структур с интенсивностью, близкой к электролюминесценции структур при их нормальной работе. Высокая интенсивность фотолюминесценции может быть обусловлена диффузией неравновесных носителей в квантовую яму, что приводит к увеличению их концентрации и, как следствие, увеличению квантового выхода.

Ключевые слова: радиационная стойкость, нейтронное облучение, гамма-облучение, люминесценция GaN и GaAs диодов.

Введение

Наиболее сложной задачей при исследовании приборов оптоэлектроники, а в частности, светоизлучающих структур, является задача регистрации выходных параметров в момент воздействия ионизирующего излучения. Проблемы, связанные с регистрацией в момент воздействия, обусловлены низкой стойкостью оптических трактов и детекторов к ионизирующему излучению. В данной работе предложена схема регистрации и проведены исследования фото- и электролюминесценции светодиодов (СД) на основе GaN и GaAs в момент воздействия импульса n-γ-излучения.

1. Образцы

В работе исследованы два типа образцов:

1. Светодиоды на основе структуры GaN/InGaN с пятью квантовыми ямами (рис. 1). Структуры изготовлены в РФЯЦ-ВНИИТФ. Пиковая длина волны примерно равна 465 нм.

2. Светодиоды AL108AM на основе структуры AlGaAs/GaAs промышленного производства. Пиковая длина волны примерно равна 845 нм.

p-GaN:Mg	0,2 мкм
MQW	0,1 мкм
n-GaN:Si	2 мкм
GaN-буфер	0,5 мкм
Al ₂ O ₃ подложка	430 мкм

Рис. 1. GaN/InGaN светодиодная структура

2. Методика эксперимента

Облучение проводилось на импульсном твердотельном ядерном реакторе ЭБР-Л [1]. Особенностью комплекса, созданного на базе ЭБР-Л, является наличие системы вывода и регистрации светового излучения из канала реактора. При максимальном числе делений, равном $1.5 \cdot 10^{17}$, флюенс нейтронов в канале составляет $3.5 \cdot 10^{14}$ н/см², полуширина импульса 60 мкс.

Экспозиционная доза гамма-излучения измерялась по методике СГД-8, погрешность измерений не более 20% [2]. Флюенс нейтронов регистрировался по методике РИД-Н, погрешность измерений не более 20% [3].

Регистрация люминесценции образцов проводилась по схеме, представленной на рис. 2. Излучение от светодиода по системе вывода, включающей поворотные зеркала и фокусирующую линзу, передавалось к фотоприемнику. Для выделения свечения структур, связанного с электролюминесценцией, исследуемые образцы возбуждались прямоугольными импульсами напряжения с длительностью около 10 мкс. Ток инжекции, протекающий через светодиоды, составлял примерно 30 мА. Длина оптического тракта от образца до фотоприемника составляла примерно 15 м. Сигнал с фотоприемника (ФЭУ НАМАМАТСУ H6780-20) регистрировался осциллографом TDS 3052B. В ходе экспериментов было показано, что регистрируемые сигналы обусловлены только процессами, происходящими в исследуемых образцах.

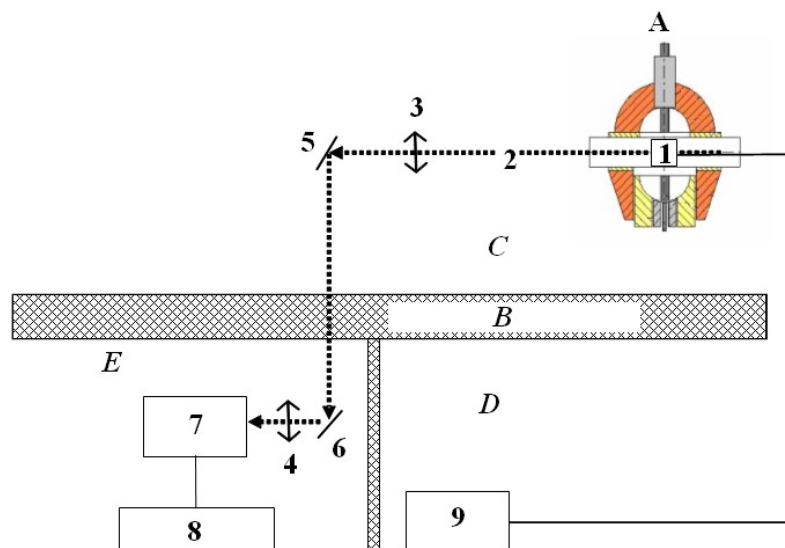


Рис. 2. Схема регистрации люминесценции светодиода при облучении. 1 – исследуемый образец; 2 – контролируемое излучение; 3, 4 – фокусирующие линзы; 5, 6 – поворотные зеркала; 7 – ФЭУ НАМАМАТСУ H6780-20; 8 – осциллограф TDS 3052B; 9 – генератор импульсов Г5-15; А – активная зона реактора; В – биологическая защита; С – реакторный зал; D – пультная; Е – приборный бокс

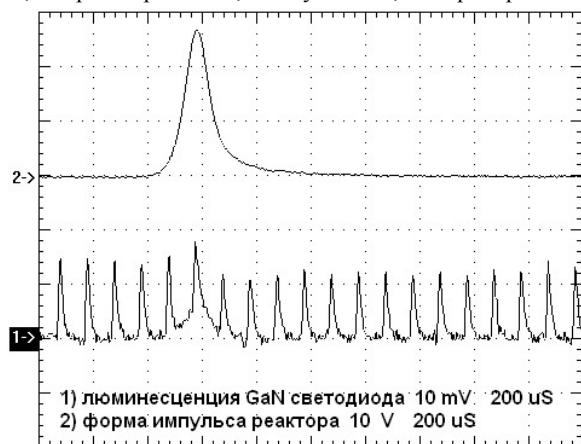


Рис. 3. Осциллограмма сигнала фотодетектора, регистрирующего люминесценцию GaN светодиода (сигнал 1) и осциллограмма сигнала детектора нейтронного излучения (сигнал 2) с дозой гамма-квантов $D=2.6 \cdot 10^4$ Р и флюенсом нейтронов $\Phi=1 \cdot 10^{14}$ н/см²

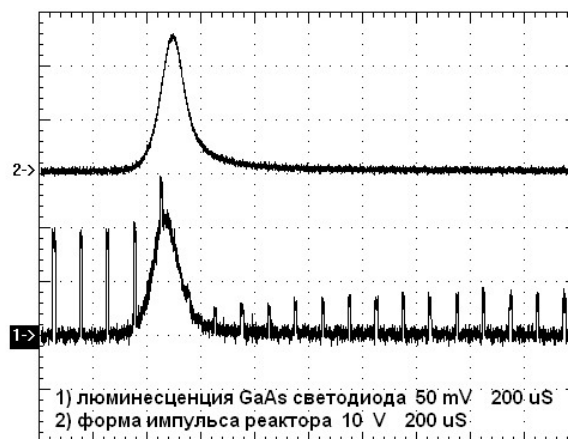


Рис. 4. Осциллограмма сигнала фотодетектора, регистрирующего люминесценцию GaAs светодиода (сигнал 1) и осциллограмма сигнала детектора нейтронного излучения (сигнал 2) с дозой гамма-квантов $D=1 \cdot 10^3$ Р и флюенсом нейтронов $\Phi=5 \cdot 10^{12}$ н/см²

3. Результаты эксперимента

На рис. 3 представлены форма импульса излучения и реакция GaN светодиода на воздействие ионизирующего излучения реактора. Из рисунка видно, что импульсы электролюминесценции СД, частота и длительность которых задаются генератором, изменяют амплитуду в момент и после воздействия импульса излучения. В момент воздействия наблюдается вспышка, по форме близкая к импульсу реактора; по амплитуде приращение свечения составляет примерно 30% от амплитуды электролюминесценции. Облучение флюенсом нейтронов $1 \cdot 10^{14}$ н/см² приводит к уменьшению световыхода GaN светодиода примерно на 10%. Данное измене-

ние интенсивности электролюминесценции согласуется с результатами, полученными ранее [4], где измерения производились через несколько дней после облучения. Контроль параметров диода в течение нескольких минут после воздействия не выявил дальнейшего изменения световыхода структур.

Результаты облучения GaAs СД представлены на рис. 4. Из рисунка видно, что в момент воздействия наблюдается вспышка, по форме близкая к импульсу излучения, а по амплитуде соответствующая электролюминесценции, вызванной протеканием тока 30 мА. Облучение флюенсом нейтронов $5 \cdot 10^{12}$ н/см² приводит к уменьшению световыхода GaAs светодиода более чем на 70%. Контроль параметров диода в

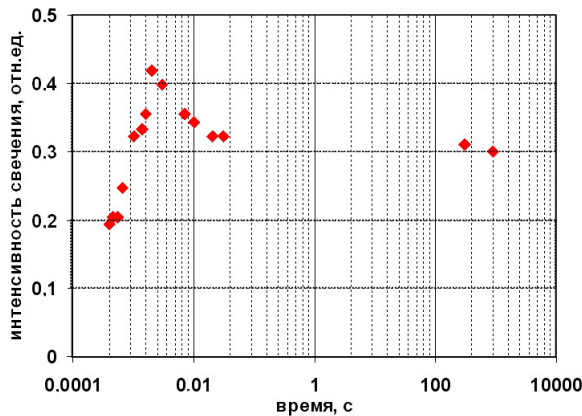


Рис. 5. Изменение интенсивности электролюминесценции GaAs СД после облучения $D=1 \cdot 10^3$ Р, $\Phi=5 \cdot 10^{12}$ н/см²

течение нескольких минут после воздействия показал, что электролюминесценция облученного образца меняется по сложному закону (см. рис. 5). Данные на рис. 5 нормированы на амплитуду интенсивности свечения до облучения. Из рисунка видно, что после воздействия импульса n - γ -излучения длительностью ~ 120 мкс наблюдаются два процесса: отжиг с характерным временем ~ 5 мс и дальнейшая деградация структуры (отрицательный отжиг) с характерным временем ~ 1 с. Длина волны радиационно-наведенной фотолуминесценции совпадает с длиной волны излучения GaN/InGaN и Al-GaAs/GaAs светодиодов при электролюминесценции.

4. Обсуждение результатов эксперимента

В работе [4] приведены результаты исследования влияния нейтронного облучения на интенсивность электролюминесценции и кинетику свечения светодиодов, аналогичных исследуемым в данной работе. Проведен подробный анализ полученных результатов. Поэтому основное внимание при анализе экспериментальных результатов в настоящей работе уделено фотолуминесценции исследуемых структур в момент воздействия.

В работе [4] показано, что влияние нейтронного облучения на интенсивность электролюминесценции и кинетику свечения можно описать, используя уравнение кинетики

$$\frac{dn}{dt} = G - Bn^2 - (A + k\Phi)n, \quad (1)$$

где n – концентрация электронов, B – коэффициент излучательной рекомбинации, A – коэффициент безызлучательной рекомбинации, k – коэффициент, учитывающий влияние нейтронного облучения, Φ – флюенс нейтронов, G –

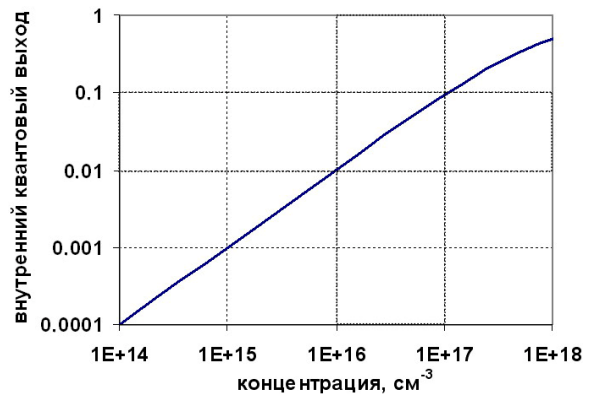


Рис. 6. Расчетная зависимость внутреннего квантового выхода GaN-структуры от концентрации неравновесных носителей

функция генерации, в случае токовой инжекции носителей $G = \frac{I}{Sde}$, где I – ток инжекции в активную область, S – площадь контактов, d – ширина квантовой ямы, e – заряд электрона. В работе [4] коэффициенты уравнения (1) имели следующие значения для GaN СД: $B = 0.5 \cdot 10^{-10}$ см³·с⁻¹, $A = 0.5 \cdot 10^8$ с⁻¹, $d = 3 \cdot 10^{-7}$ см, $S = 6 \cdot 10^{-4}$ см², $k = 3 \cdot 10^{-7}$ с⁻¹·см²; для GaAs СД: $B = 1 \cdot 10^{-10}$ см³·с⁻¹, $A = 0.2 \cdot 10^8$ с⁻¹, $d = 10^{-6}$ см, $S = 6 \cdot 10^{-4}$ см², $k = 1 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹·см².

Из уравнения (1) можно выразить внутренний квантовый выход как $\eta = \frac{Bn}{Bn + A}$, откуда

следует, что квантовый выход растёт при повышении концентрации носителей в активной области прибора (рис. 6). Высокая квантовая эффективность СД достигается использованием квантовых ям, уменьшение размеров активной области СД до нанометровых толщин позволяет увеличить концентрацию носителей в яме на несколько порядков.

Рассмотрим фотолуминесценцию на примере структуры, выполненной на основе нитрида галлия. Анализ фотолуминесценции будем проводить на основании уравнения (1), но без учета влияния нейтронов ($k = 0$).

При облучении СД ионизирующим излучением возбуждение неравновесных носителей происходит по всему объёму структуры. Неравновесные носители, находящиеся на расстояниях от квантовой ямы, меньших, чем длина диффузии L , будут захвачены квантовой ямой, а следовательно, концентрация неравновесных носителей в квантовой яме возрастёт на величину $\sim \frac{L}{d}$. По всей видимости, наблюдаемая в эксперименте высокая фотолуминесценция и явля-

ется следствием компрессии неравновесных носителей с большого объема в квантовую яму.

Оценим данный эффект количественно. В эксперименте, представленном на рис. 3, длительность импульса на полувысоте составила $t_u \approx 120$ мкс, экспозиционная доза в канале реактора $D = 2.6 \cdot 10^4$ Р, что будет соответствовать мощности поглощенного излучения в GaN, равной $P(t) \approx 5.7 \cdot 10^8$ Рад/с. При таком значении мощности поглощенной дозы наблюдаемое в эксперименте свечение образца эквивалентно электролюминесценции при пропускании тока $I \approx 10$ мА.

При воздействии ионизирующего излучения на диоды в структуре возникают фототоки, которые будут приводить к инжекции носителей в квантовую яму:

$$I_{\phi} \approx (D_e \frac{n}{L_e} + D_p \frac{p}{L_p}) e S_c, \quad (2)$$

где p – концентрация дырок, D_e, D_p – коэффициенты диффузии для электронов и дырок соответственно, L_e, L_p – диффузионные длины неосновных носителей, S_c – площадь структуры, $S_c = 500 \times 500$ мкм². Для GaN коэффициенты диффузии равны $D_e = 39$ см²/с, $D_p = 0.75$ см²/с [5].

Оценим диффузионные длины носителей по выражению $L = \sqrt{D\tau}$. Время жизни неравновесных носителей при невысоких концентрациях ($n < 10^{17}$ см⁻³) можно оценить из (1) как $\tau \approx 1/A = 2 \cdot 10^{-8}$ с. Полагая τ для дырок и электронов одинаковым и равным $2 \cdot 10^{-8}$ с, получим $L_e \approx 8.8 \cdot 10^{-4}$ см, $L_p \approx 1.2 \cdot 10^{-4}$ см. Если длительность возбуждающего импульса много больше времени жизни неравновесных носителей, то из выражения (1) следует, что концентрация неравновесных носителей определяется как $n(t) = p(t) \approx G(t)\tau$. Определим функцию генерации $G(t)$ в случае возбуждения неравновесных носителей ионизирующим излучением. Согласно [6]

$$G(t) \approx \frac{6.25 \cdot 10^{13} P(t) \rho}{3E_g}, \quad \text{здесь } P(t) \text{ – мощность}$$

поглощенного излучения (Рад/с), E_g – ширина запрещенной зоны, для GaN $E_g \approx 3.4$ эВ, ρ – плотность материала, для GaN $\rho = 6.15$ г/см³. Получаем $G(t) \approx 2.2 \cdot 10^{22}$ см⁻³с⁻¹, отсюда концентрация неравновесных носителей имеет значение порядка $p = n \sim 4 \cdot 10^{14}$ см⁻³. В итоге значение фототока $I_{\phi} \approx 9$ мА, что близко к рабочим токам светодиода.

Наблюдаемый в эксперименте высокий уровень фотолюминесценции при воздействии ионизирующего излучения может быть полезен для практических применений. Высокая конверсия поглощенной энергии в излучение видимого диапазона и низкая чувствительность к

нейтронному облучению GaN структур [4] создают предпосылки для изготовления сцинтилляционных детекторов ионизирующего излучения на базе данных структур. Быстродействие данных сцинтилляторов будет определяться временем жизни неравновесных носителей и по предварительным оценкам составит ~ 10 нс. К достоинствам данных структур можно отнести и возможность их эксплуатации при высоких температурах вплоть до 500⁰С.

Заключение

Выполнены исследования фото- и электролюминесценции GaN и GaAs светодиодов в момент воздействия импульса n-γ-излучения.

Показано, что при воздействии ионизирующего излучения с мощностью экспозиционной дозы $\sim 10^8$ Р/с для диодов GaN и $\sim 10^7$ Р/с для диодов на основе GaAs наблюдается фотолюминесценция с интенсивностью, близкой к электролюминесценции структур при протекании через них рабочих токов. Длина волны радиационно-наведенной фотолюминесценции совпадает с длиной волны излучения GaN/InGaN и AlGaAs/GaAs светодиодов при электролюминесценции.

Продемонстрировано, что высокая, наведенная облучением, люминесценция связана с увеличением концентрации неравновесных носителей в квантовой яме. Увеличение концентрации происходит за счет инжекции носителей с прилегающих к квантовой яме областей.

Электролюминесценция GaAs СД после воздействия импульса n-γ-излучения изменяется по сложному закону, наблюдается эффект отрицательного отжига.

Слабая деградация GaN-структур при нейтронном облучении и высокий коэффициент конверсии поглощенной энергии в видимое излучение создают предпосылки для создания на базе данных структур сцинтилляторов для регистрации ионизирующих излучений.

Список литературы

1. Леваков Б.Г., Лукин А.В., Магда Э.П., Погребов И.С., Снопков А.А., Терехин В.А. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002. 608 с.
2. Бакулин А.П., Ноздрачев С.Ю. Методика выполнения измерений экспозиционной дозы гамма-излучения с помощью детекторов СГД-8. НИИП, инв. № М-158. 2003.
3. Афанасьев В.Н., Бычков В.Б., Кедров А.В., Лыжин А.В., Мингазов О.А., Пудов В.П., Серебряков А.К. Способ регистрации набора флюенса нейтронов на импульсных реакторах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия

на радиоэлектронную аппаратуру. 2001. Вып. 3–4. С. 119–121.

4. Ворожцова И.В., Дубровских С.М., Ткачёв О.В., Шукайло В.П. Влияние нейтронного излучения на GaAs и GaN светоизлучающие структуры // В сб.: IX Межотраслевая конференция по радиационной стойко-

сти. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ. С. 92–99.

5. Шуберт Ф. Светодиоды / Под ред. А.Э. Юновича. М.: Физматлит, 2008. 495 с.

6. Громов В.Т. Введение в радиационную физику твёрдого тела. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007. 208 с.

LUMINESCENCE OF GAN AND GAAS DIODES UNDER n - γ -IRRADIATION

*V.P. Shukailo, S.V. Obolensky, N.V. Basargina, I.V. Vorozhtsova,
S.M. Dubrovskikh, O.V. Tkachev*

Photo- and electroluminescence of GaN and GaAs light-emitting diodes have been studied at the time of n - γ radiation pulse. The action of ionizing radiation with an exposure dose of $\sim 10^8$ R/s for GaN diodes and $\sim 10^7$ R/s for GaAs diodes has been shown to induce the photoluminescence with the intensity close to that observed under normal operation of the diode. High intensity of the photoluminescence may be caused by the diffusion of nonequilibrium carriers into the quantum well, which leads to the increase of carrier concentration resulting in the quantum efficiency increase.

Keywords: radiation hardness, neutron irradiation, gamma irradiation, luminescence of GaN and GaAs diodes.