

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК AlInGaP СВЕТОДИОДОВ КРАСНОГО ЦВЕТА СВЕЧЕНИЯ, ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ И ГАММА КВАНТАМИ

Леготин С.А.¹, Зайцев С.Н.², Мурашев В.Н.¹, Рыжиков И.В.²

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего, профессионального образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4), e-mail: ynmurashev@mail.ru

²Московский государственный университет приборостроения и информатики, 107996, г. Москва, ул. Стромынка, д.20

Исследована партия светодиодов на основе AlGaInP гетероструктур красного цвета свечения. Построены вольт-амперные и люмен-амперные характеристики до и после облучения нейтронами и гамма квантами. По данным характеристикам определена радиационная стойкость данных СИД. Источником нейтронов с энергией 2,65 МэВ являлся горизонтальный канал реактора ИРТ-2000 МГФИ с устройством, позволяющим варьировать спектр нейтронов. В качестве источника гамма квантов с энергией 1,25 МэВ использовали кобальтовую пушку ГУ-2000. Максимум спектральной кривой светодиодов лежал при 630–650 нм. Получены зависимости «фактора неидеальности» β от напряжения, тока, флюенса нейтронного и дозы гамма облучения. Определено, что гамма облучение не оказывало существенного влияния на электрические и световые характеристики до дозы 10^7 рад.

Ключевые слова: AlInGaP гетероструктура, светодиод, облучение нейтронами, облучение гамма квантами, исследование характеристик, вольт-амперная характеристика, люмен-амперная характеристика.

STUDY OF CHARACTERISTICS AlInGaP RED LEDS, BY IRRADIATION NEUTRONS AND GAMMA RAYS

Legotin S.A.¹, Zaytsev S.N.², Murashev V.N.¹, Ryzhikov I.V.²

¹National University of Science and Technology "MISIS"

²Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science

Are investigated light-emitting diodes on the basis of AlGaInP of heterostructures of red color of a luminescence. Are constructed current-voltage and lumen-voltage characteristics before and after irradiation by neutrons and gamma rays. According to the characteristics defined radiation resistance of LEDs. The source of neutrons with energies of 2.65 MeV was horizontal channel IRT-2000 MGFI with a device enabling them to vary the neutron spectrum. The source of gamma rays with energies of 1.25 MeV using cobalt gun GU-2000. Maximum of the spectral curve of LEDs lying at 630-650 nm. The dependences of the «nonideality factor» β on the voltage, current, neutron fluence and dose of gamma irradiation. Determined that gamma irradiation had no significant effect on the electrical and lighting characteristics to a dose of 10^7 rad.

Keywords: AlInGaP heterostructure, LED, irradiation by neutrons, gamma rays irradiation, the research of characteristics, current-voltage characteristics, lumen-voltage characteristics.

Введение

Благодаря бурному развитию оптоэлектроники в последние 10–15 лет были созданы мощные излучатели на базе AlInGaP и AlInGaN гетероструктур, которые по эффективности, надёжности, возможности получения чистых цветов от красного до ультрафиолетового превзошли светодиоды первого поколения на основе бинарных соединений и трёхкомпонентных растворов A^3B^5 .

Между тем при использовании приборов в ядерной электронике, космическом приборостроении, бортовой и военной аппаратуре сведения о радиационной стойкости изделий являются необходимыми, а в ряде случаев определяющими. В этой связи исследования радиационной деградации и оценка радиационной стойкости светодиодов

нового поколения на основе AlInGaP гетероструктур красного и желтого цвета свечения представляются весьма актуальными в русле их использования в спецаппаратуре, если не в настоящее время, то в ближайшем будущем.

Результаты и методика эксперимента

Была исследована партия светодиодов на основе AlGaInP гетероструктур красного цвета свечения. Максимум спектральной кривой светодиодов лежал при 630–650 нм. Светодиоды облучали нейтронами и гамма квантами. Источником нейтронов с энергией 2,65 МэВ являлся горизонтальный канал реактора ИРТ-2000 МГФИ с устройством, позволяющим варьировать спектр нейтронов. В качестве источника гамма квантов с энергией 1,25 МэВ использовали кобальтовую пушку ГУ-2000. У светодиодов (СД) до и после облучения измеряли люмен-амперные характеристики (ЛАХ) и вольт-амперные характеристики. Измерение ВАХ и ЛАХ проводили в автоматическом режиме с использованием оригинальных методов и измерительных установок на базе персонального компьютера.

Вольт-амперные характеристики светодиодов, излучающих в красной области спектра, до и после облучения нейтронами и гамма квантами приведены на рис. 1.

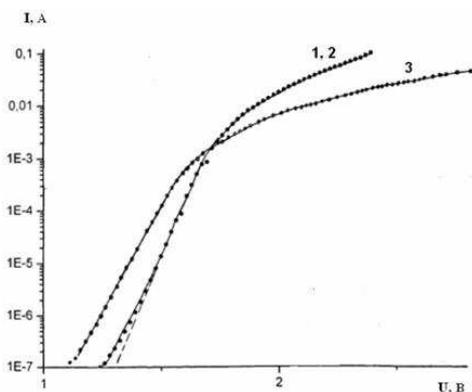


Рис. 1. ВАХ СД с красным цветом свечения до и после облучения нейтронами и гамма квантами. 1 – Φ , $D = 0$; 2 – $\Phi = 4,7 \cdot 10^{13}$ н/см², $D = 10^7$ рад; 3 – $\Phi = 4,7 \cdot 10^{15}$ н/см²

Как до, так и после облучения нейтронами с флюенсом менее $4,7 \cdot 10^{13}$ н/см² и гамма квантами с дозой менее 10^7 рад ВАХ состояли из двух экспоненциальных и одного степенного участка. На графиках рис. 2.6.4 (а) и (б) показаны зависимости «фактора неидеальности» (β) экспоненциального участка от напряжения и тока.

В интервале напряжений 1,3 – 1,6 В, токов $5 \cdot 10^{-7}$ – $3 \cdot 10^{-6}$ А, флюенсов

$0 - 4,7 \cdot 10^{13}$ н/см², доз – $0 - 10^7$ рад фактор $\beta = 2,0$. В интервале токов $6 \cdot 10^{-6}$ – $4 \cdot 10^{-4}$ А $\beta = 1,5$. После $\Phi = 4,7 \cdot 10^{15}$ н/см² $\beta = 2,0$ в широком интервале токов 10^{-6} – 10^{-4} А.

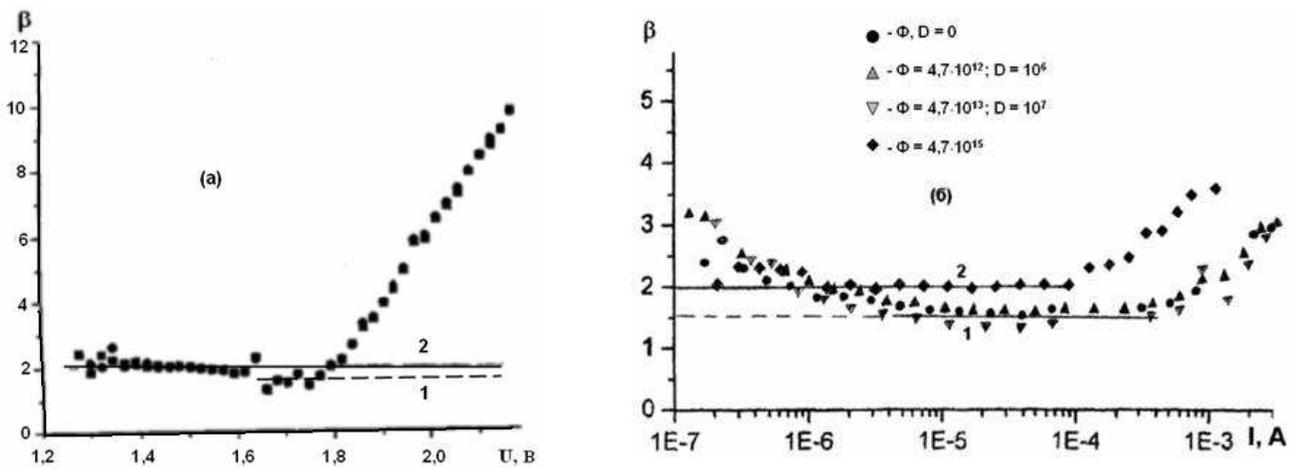


Рис. 2. Зависимость «фактора неидеальности» β от напряжения (а), тока (б), флюенса нейтронного и дозы гамма облучения 1 – $\Phi = 0, D = 0 \cdot 10^7$ рад; 2 – $\Phi = 4,7 \cdot 10^{15}$ н/см²

Из графиков рис. 1 и 2 следует, что экспоненциальные участки ВАХ могут быть представлены в следующем виде:

$$I = I_{S1} \exp\left(\frac{eU}{2kT}\right) + I_{S2} \exp\left(\frac{eU}{1,5kT}\right), \quad (1)$$

где I – ток, а U – напряжение на гетероструктуре;
 T – температура, К;
 e – заряд электрона;
 k – постоянная Больцмана.

Первый экспоненциальный участок наблюдался в широком, а второй – ограниченном интервале флюенсов (доз) облучения. Величина «тока насыщения» (I_{S1}) увеличивалась примерно на порядок после облучения нейтронами с $\Phi = 4,7 \cdot 10^{15}$ н/см².

Степенные участки ВАХ светодиодов, излучающих в красной области спектра, приведены на рис. 3.

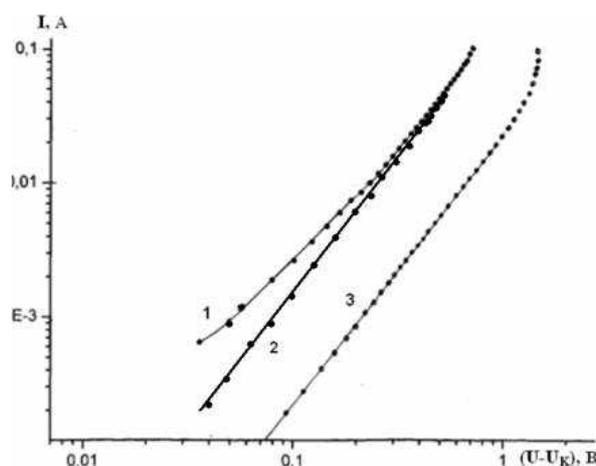


Рис. 3. Степенные участки ВАХ СД с красным цветом свечения до и после облучения нейтронами и гамма квантами. 1 – Φ , $D = 0$; $n = 1,5$, $B = 0,085$ А/В, $U_k = 1,68$ В;
 2 – $D = 10^7$ рад, $n = 2$, $B = 0,167$ А/В, $U_k = 1,60$ В;
 3 – $\Phi = 4,7 \cdot 10^{15}$ н/см², $n = 2$, $B = 0,0178$ А/В, $U_k = 1,45$ В

Они могут быть аппроксимированы следующей эмпирической формулой:

$$I = B(U - U_k)^n. \quad (2)$$

Параметры ВАХ (n , B и U_k) при различных флюенсах и дозах облучения приведены в подрисуночных подписях. До облучения и после небольших флюенсов и доз облучения показатель степени $n = 1,5$ при токе менее 10^{-2} А и $n = 2$ при бóльшем значении тока. После облучения ($\Phi = 4,7 \cdot 10^{15}$ н/см² или $D = 10^7$ рад) $n = 2$ во всем интервале токов. После $\Phi = 4,7 \cdot 10^{15}$ н/см² величина коэффициента B снижалась в 7–10 раз, а U_k примерно на 10 %.

Люмен-амперные характеристики гетероструктур до и после облучения приведены на графиках рис. 4.

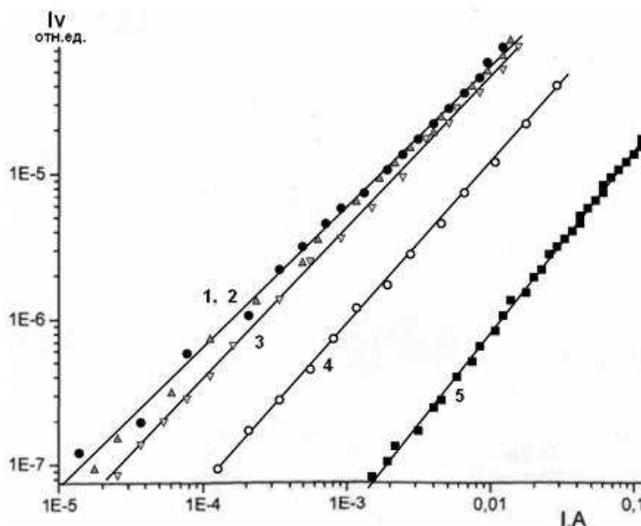


Рис. 4. Зависимость силы света от тока, флюенса нейтронного и дозы гамма облучения. Φ , н/см²; D , рад. 1 – Φ , $D = 0$; 2 – $\Phi = 4,7 \cdot 10^{12}$;
 3 – $D = 10^7$; 4 – $\Phi = 4,7 \cdot 10^{13}$; 5 – $\Phi = 4,7 \cdot 10^{15}$

До облучения и после небольших флюенсов и доз облучения зависимость силы света от тока близка к линейной. При флюенсе $4,7 \cdot 10^{13}$ н/см² она снижалась примерно на порядок, а при $\Phi = 4,7 \cdot 10^{15}$ н/см² на два порядка, а сила света становилась сверхлинейной функцией тока.

Обсуждение экспериментальных результатов и оценка константы повреждаемости времени жизни

Проведенные ранее исследования по воздействию проникающей радиации на светодиоды первого поколения показали, что основной причиной изменения электрических и

световых характеристик является генерация центров безызлучательной рекомбинации и, как следствие, снижение времени жизни [2, 3, 6]:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_{\tau} \Phi, \quad (3)$$

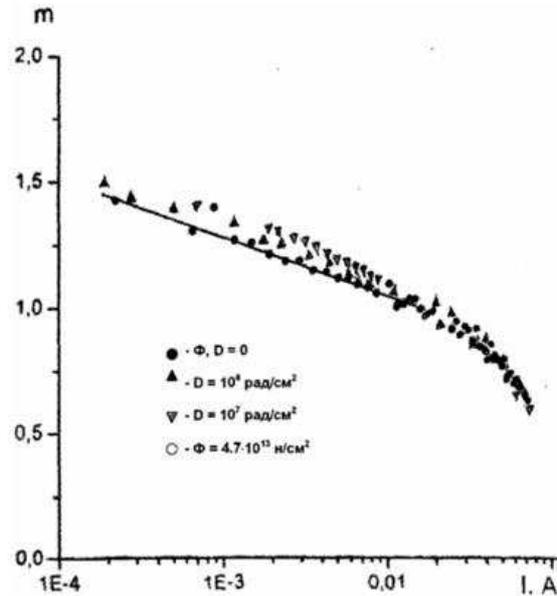


Рис. 5. Показатель степени m люмен-амперной характеристики от тока при разных дозах облучения

Т.к. при облучении у светодиодов с красным цветом свечения второй экспоненциальный участок ВАХ с $\beta = 1,5$ исчезает, а ширина компенсированного слоя превышает диффузионную длину, то изменение параметров этого слоя можно проследить по эволюции предэкспоненциального множителя первого экспоненциального участка ВАХ:

$$j_{s1} = \frac{2e\sqrt{D_p n_i}}{\sqrt{\tau_p} \sqrt{\gamma}} \quad (4)$$

Т.к. в выражении (4) не входит ширина и проводимость компенсированного слоя, то изменением этих параметров в расчетах можно пренебречь.

Используя (3) и (4) и считая, что эффекты прилипания не играют заметной роли ($\gamma = 1$) изменение тока при фиксированном напряжении, можно записать в следующем виде:

$$I(\Phi)/I(0) = (1 + \tau_{0p} K_{\tau} \Phi)^{1/2}. \quad (5)$$

Используя экспериментальные значения тока до и после облучения из (5) получаем:

$$(\tau_0 K_{\tau}) = (4,2 \pm 1,3) \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{н}. \quad (6)$$

В том случае, если прилипание играет заметную роль, вместо $(\tau_0 K_\tau)$ в (5) и (6) следует подставить $(\gamma \tau_{0p} K_\tau)$.

Степенной участок ВАХ отвечает модели Рашба – Толпыго [4] или Ламперта – Роуза [5], согласно которым аналитические зависимости тока от напряжения имеют вид [5]:

$$j = \frac{8}{9} \cdot \frac{e \mu_n \mu_p (n_0 - p_0) \tau_p}{d^3} (U - U_k)^2, \quad (7)$$

$$j = \frac{3\sqrt{\pi}}{4} \cdot \frac{(\epsilon_s \epsilon_0)^{1/2} \sqrt{b+1} D_p \sigma_n^{1/2} \tau_p^{1/2}}{d^3} (U - U_k)^2. \quad (8)$$

Детальный анализ данных участков и обозначения даны во второй главе. При анализе зависимостей тока от флюенса необходимо принимать во внимание не только деградацию времени жизни, но также изменение проводимости и ширины компенсированного слоя.

Если последними эффектами можно пренебречь, то зависимость тока от флюенса имеет следующий вид:

$$I(\Phi)/I(0) = (1 + \tau_{0p} K_\tau \Phi)^n, \quad (9)$$

где $n = 1,0$ для первой модели и $n = 0,5$ для второй, и, соответственно

$$(\tau_0 K_\tau) = (1,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{н}; \quad (\tau_0 K_\tau) = (5,3 \pm 2,1) \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{н}. \quad (10)$$

Второе значение лучше согласуется с (6.6.7). Однако на величину (8.6.9) здесь может влиять изменение проводимости и размеров компенсированного слоя.

Аналитические зависимости силы света из квантовой ямы для степенного участка ВАХ имеют следующий вид [1]:

$$I_V = \frac{\gamma_n W}{\tau_R} \sqrt{\frac{2b\tau_p(n_0 - p_0)}{e(b+1)d}} \cdot \sqrt{j}; \quad I_V = \frac{2\beta\gamma_n \gamma_p W \tau_p (n_0 - p_0)}{3e(b+1)d} \cdot j, \quad (11)$$

соответственно для линейной и «квадратичной» скорости излучательной рекомбинации носителей в квантовой яме.

Если не принимать во внимание изменения проводимости и ширины компенсированного слоя при облучении, то аналитическая зависимость для снижения силы света выглядит следующим образом:

$$I_V(0)/I_V(\Phi) = (1 + \tau_{0p} K_\tau \Phi)^n, \quad (12)$$

где $n = 0,5$ в случае линейной и $n = 1,0$ – «квадратичной» скорости рекомбинации. При токе 10^{-2} А люмен-амперная характеристика почти линейна, а отношение $I_V(0)/I_V(\Phi) = 10^2$.

Из (12) при $n = 1,0$ имеем

$$(\tau_0 K_\tau) = (2,4 \pm 1,4) \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{н}, \quad (13)$$

что в пределах погрешностей эксперимента согласуется как с первой, так и со второй моделью.

Заключение

Впервые определены константы повреждаемости времени жизни у светодиодов на основе AlInGaP красного цвета свечения. Радиационная стойкость исследованных светодиодов на порядок выше, чем светодиодов из фосфида галлия красного цвета свечения. Установлено, что вольт-амперные характеристики до и после облучения нейтронами и гамма квантами соответствовали известным диффузионным моделям двойной инжекции, что позволило разработать физическую и математическую модель гетероструктуры и на ее основе вывести аналитические зависимости силы света от тока для основных участков ВАХ. Определено, что гамма облучение не оказывало существенного влияния на электрические и световые характеристики до дозы 10^7 рад.

Работа выполнена при поддержке ГК 14.513.11.0120 от 01.07.2013 г.

Список литературы

1. Абрамов В.С., Рыжиков И.В., Селезнев Д.В. Математическая модель светоизлучающих $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}In_{0,5}P$ и $(Al_yGa_{1-y})/(In_xGa_{1-x}N)/GaN$ гетероструктур, облученных нейтронами и гамма квантами // Моделирование и исследование сложных систем: сб. М.: МГАПИ, 2005. С. 34-46.
2. Горюнов Н.Н., Клебанов Н.П., Лукашов Н.В., Маняхин Ф.И. Импульсный трехчастотный метод измерения параметров заряженных центров в области пространственного заряда полупроводниковых структур // Приборы и системы управления. 1999. № 10. С.34-42.
3. Маняхин Ф.И., Кодак А. Метод контроля технологии светодиодных структур // Компоненты и технология. 2005. № 6. С. 236-238.
4. Рашба Э.И., Толпыго К.Б. Прямая вольт-амперная характеристика плоскостного выпрямителя при значительных токах // ЖТФ. 1956. Т. 26. Вып.7. С.1419-1426.

5. Nuese C.I., Shade H. and Herrick D. Efficiency degradation of $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ electroluminescent diodes due to high-energy electron irradiation // Metal. Trans. 1970. V.1. № 3. P.587-591.
6. Lampert M.A., Rose A. Phys. Rev/ 1961. V.121. P. 26-31.

Рецензенты:

Кольцов Г.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников, НИТУ «МИСиС», г. Москва.

Бублик В.Т., д.ф.-м.н., профессор кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков, НИТУ «МИСиС», г. Москва.