

УДК: 621.383.933:621.3.029.78

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР  
AlGaInP ( $\lambda=624$  нм) С МНОЖЕСТВЕННЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ**

К. Н. Орлова<sup>1</sup>, А. В. Градобоев<sup>1</sup>, А. В. Симонова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Юргинский технологический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Юрга

<sup>2</sup> ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», г. Томск

Статья поступила в редакцию 12 октября 2016 г.

**Аннотация.** Представлены результаты исследования деградации вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами на примере светодиодов с длиной волны излучения 624 нм при воздействии быстрых нейтронов в пассивном режиме питания. Отмечены сдвиги ВАХ с увеличением флюенса нейтронов в области высоких токов в область более высоких напряжений. Выделена область неоднородности инжекции, которая вероятнее всего связана с разрушением (перестройкой) остаточных примесных комплексов Mg-H и имеет тенденцию к исчезновению по мере увеличения воздействия нейтронов.

**Ключевые слова:** гетероструктуры AlGaInP, радиационная стойкость, светодиоды.

**Abstract.** The research results of current-voltage and capacitance-watt characteristics degradation of LEDs based on AlGaInP heterostructures with multiple quantum wells on the example of the 624 nm wavelength LED are presented upon exposure to fast neutrons in a passive power mode. Current-voltage LEDs based on AlGaInP heterostructures characteristic in low currents vary slightly upon irradiation with fast neutrons fluence. Current-voltage characteristic shift with an increase in neutron fluence occurs at high currents to higher voltages. Presumably the resistance increasing is due to the resistance increasing of the contact area as a result of changes

in the mobility charge carriers, which varies as a result of defects introduced by the impact of fast neutrons. The capacitance-watt characteristics change with increasing the neutron fluence at high currents to higher voltages field. The heterogeneity injection area is selected, which is most likely linked to the residual impurity complexes Mg-H destruction (reconstruction) and tends to disappear with increasing exposure to neutrons. With increasing of fast neutrons exposure this area is reduced, and a purely radiation defects input takes place. During the transition from average to high electron injection field a change in current flow mechanism occurs for red LEDs based on heterostructures AlGaInP under irradiation by fast neutrons.

**Keywords:** heterostructures AlGaInP, radiation hardness, light-emitting diodes.

В последние годы разрабатывается огромное количество полупроводниковых устройств на основе четверных гетероструктурных соединений AlGaInP [1-4]. Ввиду использования данных светодиодов (далее СД) в космическом пространстве и других условиях повышенного радиационного фона, перед исследователями стоит задача по определению радиационной стойкости светодиодов AlGaInP и ее прогнозированию [5]. В качестве критериальных параметров определения изменений, вызванных ионизирующим излучением в полупроводниковом приборе, а именно, в светодиоде на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами, выбраны электрофизические характеристики - вольт-амперные характеристики (далее ВАХ) и вольт-ваттные характеристики (далее ВВХ). Данные характеристики являются одними из основных критериальных характеристик, используемых инженерами-конструкторами и прочим персоналом для определения оптимальных режимов работы светодиода, предельных значений подаваемого напряжения, силы тока и выходной мощности излучения.

Так как на данный момент имеется недостаточное количество экспериментальных и теоретических данных, освещающих вопросы деградации электрофизических характеристик светодиодов на основе гетероструктур

AlGaInP с множественными квантовыми ямами при воздействии нейтронного излучения, исследование по определению воздействия ионизирующего излучения на электрофизические характеристики вышеупомянутых СД является, несомненно, актуальным и представляет как научную, так и значительную практическую ценность.

Цель работы: исследование изменений ВАХ и ВВХ СД на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами при облучении быстрыми нейтронами.

Во избежание возможности отжига радиационных дефектов, каждая партия диодов разделялась на части, для каждой из которых осуществлялся как последовательный набор дозы облучения с соответствующим шагом и с проведением всех необходимых промежуточных измерений, так и однократный набор дозы. После сопоставления полученных данных, было выявлено отсутствие существенного отжига радиационных дефектов, таким образом, погрешность измерений, связанная с отжигом приборов, в некоторой степени была минимизирована.

В качестве источников быстрых нейтронов с энергией более 0,1 МэВ в данной работе использовались статические и импульсные ядерные реакторы, с длительностью импульса излучения  $1,5 \cdot 10^{-3}$  с. Степень воздействия нейтронов характеризовали флюенсом нейтронов  $F_n$  (н/см<sup>2</sup>).

Поскольку наложение электрического поля может вносить заметный вклад в скорость введения радиационных дефектов [6-7], то облучение исходных структур и приборов во всех случаях проводилось в пассивном режиме питания (т.е. без подачи внешнего электрического питания). Во всех экспериментах по облучению поток частиц был направлен перпендикулярно плоскости подложки.

Погрешность измерений составляла не более 3%. На рис. 1 для оценки достоверности результатов измерений погрешность нанесена в виде доверительных интервалов.

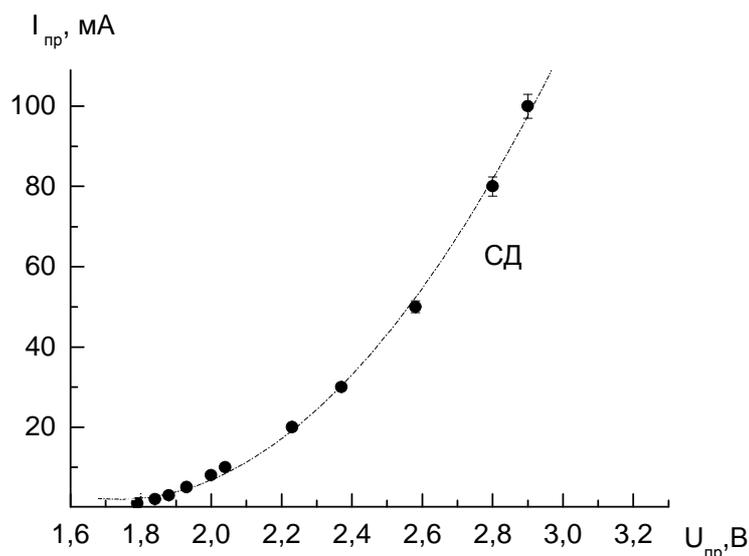


Рис. 1 – Вольт-амперная характеристика СД в линейном масштабе: СД – светодиоды на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами с длиной волны  $\lambda=624$  нм; символы – результаты измерений; линии – установленные закономерности.

Рассмотрим результаты измерений, полученные при исследовании СД на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами до проведения испытаний по облучению приборов. Рассмотрение начнем с анализа прямой ветви ВАХ, которая представлена на рис. 1. Прямые ветви ВАХ соответствуют стандартной характеристике диода с р-п – переходом при прямом смещении. В соответствии с шириной запрещенной зоны в активной области излучающих гетероструктур прямые напряжения (в рабочем диапазоне токов) красных СД около 2 В. Таким образом, исследуемые СД показывают типичную ВАХ, которая достаточно близка к зависимостям, представленным в литературе [8].

Теперь рассмотрим результаты измерения ВАХ СД красного цвета свечения которые приведены в линейных координатах на рис. 2 при воздействии ионизирующего излучения, а именно быстрых нейтронов. Хочется отметить, что при облучении быстрыми нейтронами флюенсом вплоть до

$5,06 \cdot 10^{15} \text{ н/см}^2$  снижение мощности излучения составляло  $\frac{P_x}{P_0} = 0,1$ .

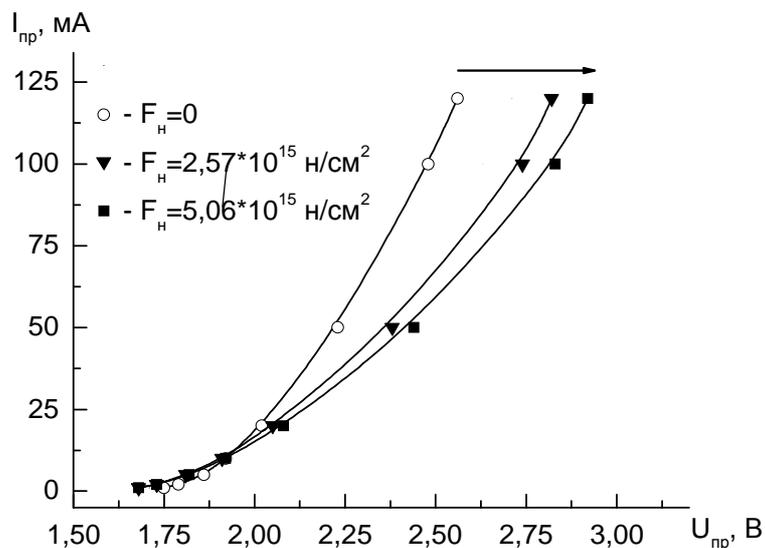


Рис. 2 – Вольт-амперная характеристика СД на основе гетероструктур AlGaInP с длиной волны  $\lambda=624$  нм с множественными квантовыми ямами при облучении быстрыми нейтронами: символы – результаты измерений; линии – установленные закономерности; стрелками показаны направления изменения ВАХ.

Все изменения в ВАХ, характерные для СД с  $\lambda=624$  нм наблюдаются в области высоких токов. В области слабых токов изменения ВАХ можно считать незначительными. Причем сдвиг ВАХ с увеличением флюенса нейтронов происходит в область более высоких напряжений. Так как в области высоких токов сопротивление активной области диода минимально, то вышеупомянутый сдвиг можно объяснить ростом сопротивления омических контактов. Согласно обзору литературных источников, сопротивление омических контактов к материалам типа GaAs увеличивается пропорционально количеству дефектов, дислокаций и прочих несовершенств структуры [9]. Таким образом, на стадии существенного снижения мощности излучения и области высоких токов, где нами наблюдается сдвиг ВАХ СД, как правило, происходит ввод дефектов чисто радиационного происхождения, и, как

следствие, увеличение сопротивления омических контактов. Тем более, что имеются данные [10], о том что омический контакт на основе Au-Ge-Ni – n-GaAs имеет более низкую радиационную стойкость по сравнению со стойкостью n-GaAs, что приводит к его ускоренной деградации при облучении.

Причем указанное увеличение сопротивления в области высоких токов нельзя отнести к увеличению сопротивления, связанного с переходом границы металл - полупроводник, так как легированные приконтактные слои, которые наплавляются с обеих сторон диода значительно снижают потенциальный барьер, позволяя потоку электронов эффективно проходить через толщу материала. Предположительно увеличение сопротивления связано с увеличением сопротивления приконтактной области в результате изменения подвижности носителей заряда, которая изменяется в результате увеличения количества дефектов и прочих несовершенств структуры твердого тела.

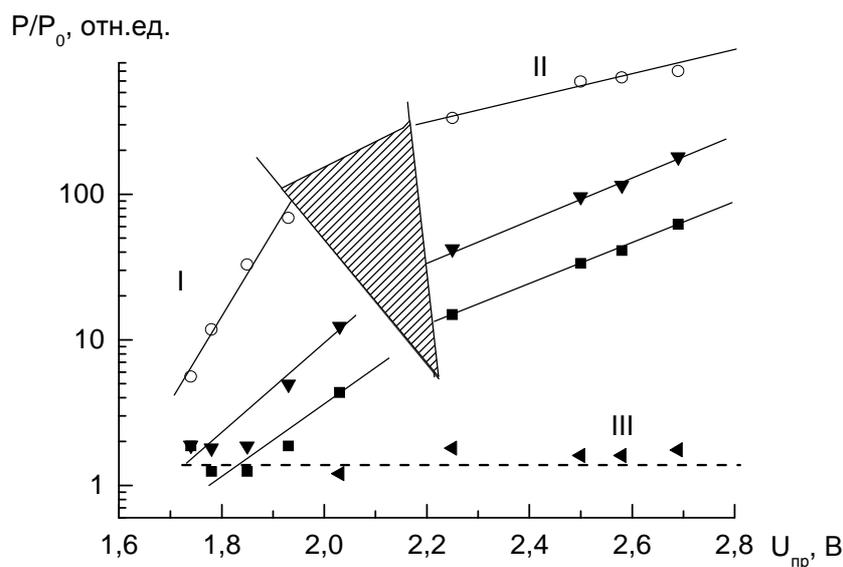


Рис. 3. – Изменения ВВХ СД при облучении быстрыми нейтронами: символы – экспериментальные данные; линии – установленные закономерности, I – область, соответствующая уровню средней инжекции; II – область, соответствующая уровню высокой инжекции; III – область, соответствующая уровню низкой инжекции; пунктирная линия – граница уровня низкой инжекции; штрихованная область – область неоднородности инжекции.

На рис. 3 показано изменение ВВХ гетероструктур СД при облучении быстрыми нейтронами. По виду полученных ВВХ, можно выделить три области (область I, II и область III), характеризующиеся различным механизмом протекания тока. Можно сделать вывод о том, что выделенные нами области относятся к областям средней, сильной и низкой инжекции электронов. Выполненные нами оценки показали, что действительно при выявленной нами границе между напряжениями, концентрация инжектируемых электронов сопоставима с концентрацией дырок в р-области. Однако переход светодиода с уровня средней инжекции в уровень высокой инжекции происходит путем преодоления промежуточной области неоднородности инжекции. Как известно, одной из основных задач, требующих решения при производстве гетероструктур с множественными квантовыми ямами, являются водородная пассивация акцепторных атомов [11,12]. При этом, в качестве акцепторной примеси в гетероструктурах AlGaInP чаще всего используют магний и в активных слоях получаемых гетероструктур может быть достаточно высокое содержание комплексов Mg-H. Таким образом, наличие области неоднородности инжекции можно объяснить неоднородностью инжекции по площади гетерограницы, которая приводит к локальным изменениям, например разрушению остаточных примесных комплексов Mg-H, образующихся в процессе роста и образованию дефектов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации [13-15].

Согласно литературным данным, подтверждается перестройка имеющейся дефектной структуры при воздействии небольших уровней ионизирующего излучения (в нашем случае быстрых нейтронов) [16-18]. При дальнейшем увеличении флюенса нейтронов и, соответственно, дегградации характеристик СД на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами происходит ввод дефектов чисто радиационного происхождения и площадь неоднородности инжекции уменьшается, а в дальнейшем совсем сходит на нет. Конечной стадией дегградационного процесса является переход СД в режим работы при низком уровне инжекции

(область III на рис. 3), при котором мощность излучения не зависит от величины рабочего тока.

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. При облучении быстрыми нейтронами флюенсом вплоть до  $5,06 \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup> ВАХ СД на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами в области слабых токов изменяются незначительно. Сдвиг ВАХ с увеличением флюенса нейтронов происходит в области высоких токов в область более высоких напряжений. Предположительно увеличение сопротивления связано с увеличением сопротивления приконтактной области в результате изменения подвижности носителей заряда, которая изменяется в результате увеличения количества дефектов вводимых в результате воздействия быстрых нейтронов.
2. Переход светодиода с уровня средней инжекции в уровень высокой инжекции происходит путем преодоления промежуточной области неоднородности инжекции, наличие которой можно объяснить неоднородностью инжекции по площади гетерограницы, которая приводит к локальным изменениям, например разрушению (перестройке) остаточных примесных комплексов Mg-H. При увеличении воздействия быстрых нейтронов данная область уменьшается и происходит ввод дефектов чисто радиационного происхождения.
3. При переходе от области средней к высокой инжекции электронов в результате облучения быстрыми нейтронами для СД на основе гетероструктур AlGaInP красного цвета свечения происходит изменение механизма протекания тока.

Переход СД в уровень низкой инжекции электронов остается конечной стадией деградиационного процесса.

## Литература

1. Спектры электролюминесценции "красных" светодиодов AlGaInP/GaAs [Текст]/ Мармалюк А.А. и др. // Известия вузов. Физика. – 2013, Т. 56, № 8. – С. 40-43.
2. Брудный, В. Н. Влияние жесткой радиации на электронные, оптические и рекомбинационные свойства соединений (Al, Ga, In)-P, (Al, Ga)-As и их твердых растворов/В. Н. Брудный // Известия вузов. Физика. – 2013, т. 56, № 8. – С.37-39.
3. Перенос носителей заряда в светодиодах на основе множественных квантовых ям  $(Al_xGa_{(1-x)})_{0.5}In_{0.5}P/(Al_{0.54}Ga_{0.46})_{0.5}In_{0.5}P$  [Текст] / И. А. Прудаев [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2014, т. 57, № 7. – С.48-51.
4. Орлова К.Н. Способы увеличения мощности излучения светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP. Приволжский научный вестник. 2012. № 10 (14). С.17-19.
5. Градобоев, А.В. Изменение вольт-амперных характеристик светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP красного и желтого цвета свечения при облучении гамма-квантами и быстрыми нейтронами [Электронный ресурс] / А.В. Градобоев, К.Н. Орлова, И.А. Асанов // Журнал радиоэлектроники. 2013. №10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/alt/oct13/9/text.pdf>
6. Гусаков, В.В. Электростимулированные процессы восстановления проводимости при облучении  $n^+ - n - n^+$  - структур GaAs [Текст] / В.В. Гусаков, А.В. Латышев, В.Ф. Стельмах // Изв.вузов. Физика. –1990. – С. 15 – 30.
7. Электрорадиационные изменения в барьерных структурах платина – арсенид галлия [Текст] / С.А Груша [и др.] // Электронная техника. Сер.2 Полупроводниковые приборы. – 1990, вып.5. – С.68-72.
8. Никифоров, С.Г. Разработка методик контроля деградации характеристик светодиодов на основе твердых растворов AlGaInP и AlGaInN / [Текст] /:

- дис. ... канд. техн. наук : 05.27.01 : защищена 22.03.07: утв. 29.09.2007 / Никифоров Сергей Григорьевич. – М., 2006. – 158 с. – Библиогр.: с.146 – 158
9. Гаман, В.И. Физика полупроводниковых приборов [Текст] / В.И. Гаман. Томск: Изд-во НТЛ. – 2000. 426 с.
10. Бланк, Т.В. Механизмы протекания тока в омических контактах металл–полупроводник [Текст] / Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг // Физика и техника полупроводников. – 2007, Т. 41, В. 11. – С. 1281-1306.
11. Red and Green Resonant Cavity LEDs for datacom applications [Text] / V. Corbett [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2003. – V. 4876. – P. 176-183.
12. Reduction of residual oxygen incorporation and deep levels by substrate misorientation in InGaAlP alloys [Text] / M. Suzuki [et al.] // J. Crystal Growth. – 1993. – V. 133. – P. 303-316.
13. Изменения люминесцентных и электрических свойств светодиодов из InGaN/AlGaN/GaN при длительной работе [Текст] / А.В. Ковалев и др // ФТП. – 1999, том 33, вып. 2. – С. 224-232.
14. Юнович, А. Э. Дивакансия азота — возможная причина желтой полосы в спектрах люминесценции нитрида галлия [Текст] / А.Э. Юнович // ФТП. – 1998, Т 32, № 10. – С. 1181-1183.
15. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов [Текст] / Н.И. Бочкарева и др. // ФТП. – 2006, Т 40, В.1. – С. 122-127.
16. Градобоев, А.В. Исследование деградации мощности излучения гетероструктур AlGaInP красного и желтого цвета свечения при облучении гамма-квантами [Электронный ресурс] / А.В. Градобоев, К.Н. Орлова, И.А. Асанов // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr13/7/text.pdf>.
17. Градобоев, А.В. Деградация параметров гетероструктур AlGaInP при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами [Текст] / А.В. Градобоев, К.Н. Орлова, И.А. Асанов // Вопросы атомной науки и

техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2013, № 2. – С. 64-66.

18. Градобоев, А.В. Облучение гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$  светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами [Текст] / А.В. Градобоев, К.Н. Орлова, И.А. Асанов // Перспективные материалы. – 2013; № 7. – С. 49 – 55.