

Облучение гамма-квантами ^{60}Co светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами

А. В. Градобоев, К. Н. Орлова, И. А. Асанов

Исследовано изменение параметров светодиодов (СД), изготовленных из различных гетероструктур AlGaInP ($\lambda_1 = 590$ нм и $\lambda_2 = 630$ нм), с множественными квантовыми ямами, при облучении гамма-квантами ^{60}Co в пассивном режиме питания. По виду вольт-амперной (ВАХ) и ватт-амперной характеристик (ВтАХ) исходных диодов выделены области средней и высокой инжекции электронов. Наклон закономерности изменения мощности излучения и рабочего тока в области средней инжекции практически не зависят от ширины запрещенной зоны, в то время как в области высокой инжекции электронов наклон ВАХ и ВтАХ увеличивается с уменьшением ширины запрещенной зоны. С ростом экспозиционной дозы мощность излучения уменьшается прямо пропорционально дозе и обратно пропорционально величине рабочего тока, при котором проводится измерение мощности, а также увеличиваются различия между областями средней и высокой инжекции электронов. Представлена радиационная модель СД, согласно которой деградация мощности излучения при облучении гамма-квантами происходит в два этапа: на первом этапе происходит введение центров безизлучательной рекомбинации (или центров поглощения излучения), а на втором этапе происходит снижение мощности излучения.

Ключевые слова: светодиоды, квантовые ямы, инжекция электронов, ширина запрещенной зоны.

There are results of the study of parameters of LEDs with multiple quantum wells, made of various heterostructures AlGaInP ($\lambda_1 = 590$ nm and $\lambda_2 = 630$ nm) and irradiated by gamma rays ^{60}Co . Irradiation was in passive mode. According to the type of current-voltage and light-current characteristics of the original diodes marked area average electron injection and area high electron injection. Slope patterns of change of the radiation power and operating current in the area average electron injection is almost independent of the band gap, while in the area high electron injection slope of current-voltage and light-current characteristics increases with decreasing band gap. With increasing exposure dose radiation power is reduced in direct to dose and inversely proportional to the operating current, which is measured. The difference between the area average electron injection and area high electron injection is increased. LED radiation model are presented, according to which the degradation of the radiation power irradiated by gamma rays is in two stages: the first stage is the introduction of nonradiative recombination centers (centers or absorption), and the second step is the loss of power.

Keywords: LEDs, quantum wells, electron injection, band gap.

Введение

СД видимого диапазона длин волн, в том числе на основе гетероструктур AlGaInP, все активнее используются в радиоэлектронных устройствах различного назначения [1]. При этом по условиям эксплуатации, СД могут подвергаться действию различных радиационных факторов [2, 3], что

выдвигает определенные требования по их стойкости воздействию ионизирующего излучения.

К настоящему времени имеется достаточно ограниченное количество работ по исследованию радиационной стойкости СД на основе гетероструктур AlGaInP [4, 5]. Отсутствие достаточных сведений о радиационной стойкости СД не позволяет создать их радиационную модель, решать задачи прогнозирова-

ния стойкости. Это затрудняет эффективное производство СД с заданной радиационной стойкостью.

Следует особо подчеркнуть практически полное отсутствие сведений о радиационной стойкости гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами, которые в настоящее время наиболее широко используют для изготовления СД различного назначения. Ранее [6] мы представили результаты предварительного исследования радиационной стойкости СД на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами при облучении гамма-квантами ^{60}Co .

Цель работы — разработка радиационной модели СД на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами на основе исследования закономерностей изменения их параметров при облучении гамма-квантами ^{60}Co .

Объекты исследования и методика эксперимента

На основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами, которые были получены из различных источников, были изготовлены СД с $\lambda_1 = 590$ нм (LED1) и СД с $\lambda_2 = 630$ нм (LED2) путем использования стандартной технологии в условиях серийного производства. Исследуемые СД отличались шириной запрещенной зоны, то есть составом активного слоя. Геометрические размеры кристаллов и концентрация носителей заряда в активных слоях исследуемых гетероструктур были сопоставимы, поэтому плотности рабочего тока СД можно считать близкими.

Для формирования направленного пучка излучения СД использовали линзу, изготовленную из оптического компаунда. Предварительные исследования радиационной стойкости используемого оптического компаунда показали, что во всем диапазоне используемых доз облучения его оптическая прозрачность остается без изменений в требуемом диапазоне длин волн. Тогда, можно утверждать, что все наблюдаемые перемены светотехнических характеристик СД в результате облучения будут обусловлены только соответствующими изменениями в его кристалле.

Для проведения исследований были сформированы различные партии СД, при этом количество СД в партии было не менее 10 штук. Облучение СД гамма-квантами ^{60}Co проводили в нормальных условиях в пассивном режиме питания, то есть без подачи рабочего тока. Степень воздействия при облучении характеризовали экспозиционной дозой в Гр. До и после облучения измеряли прямую и обратную ветви ВАХ, вольт-фарадную характерис-

тику (ВФХ) при обратном смещении, спектр излучения и ВтАХ в шаре. Каждую партию СД характеризовали средним значением мощности излучения. Разброс мощности излучения в партии СД до облучения не превышал 10%, а после облучения достигал 15%. Каждому экспериментальному значению на представленных ниже зависимостях соответствует среднее значение параметра для партии СД.

Для различных партий СД требуемый уровень воздействия обеспечивали как последовательным набором дозы облучения, так и однократным облучением. Идентичность полученных результатов при различных условиях набора дозы облучения позволяет сделать вывод о том, что весь комплекс промежуточных измерений не приводит к отжигу радиационных дефектов.

Результаты исследований и их анализ

На рис. 1 показаны типичные прямые ветви ВАХ и ВтАХ для исследуемых СД до облучения. Видно, что для исходных диодов можно очень четко выде-

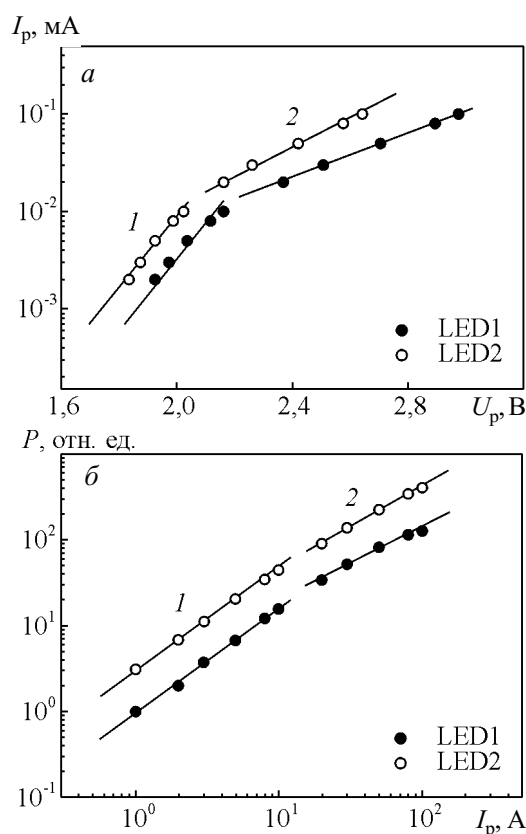


Рис. 1. ВАХ (а) и ВтАХ (б) характеристики исходных СД: символы — результаты измерений; линии — установленные закономерности; 1 — средняя инжекция электронов; 2 — высокая инжекция электронов

лить области низкой и высокой плотности тока. Для каждой из выделенных областей имеется своя специфическая зависимость на анализируемых закономерностях. Отметим, что граница между выделенными областями плотности тока хорошо видна как на ВАХ, так и на ВтАХ и расположена при достаточно близких значениях прямого тока, то есть при близких значениях плотности тока.

Рассмотрим более подробно характерную границу, наблюдаемую на рис. 1. Для инжекционного тока в p - n -переходе, протекающего при прямом смещении (это происходит при работе СД), можно выделить три характерных области [7]: область слабой инжекции (концентрация электронов, инжектируемых в p -область перехода, много меньше концентрации дырок в этой области); область средней инжекции (концентрация инжектируемых электронов меньше концентрации дырок) и область высокой инжекции (концентрация инжектируемых электронов больше концентрации дырок). По виду полученных ВАХ (рис. 1а), можно сделать вывод о том, что выделенные нами области относятся к областям средней и сильной инжекции электронов. Область слабой инжекции электронов исключена из рассмотрения, поскольку в этом случае величина протекающего тока практически не зависит от напряжения прямого смещения. Граница между областями средней и сильной инжекции электронов определяется равенством концентрации инжектируемых электронов и концентрации дырок в p -области. Выполненные нами оценки показали, что действительно при выявленных нами граничных значениях плотности рабочего тока СД концентрация инжектируемых электронов сопоставима с концентрацией дырок в p -области.

Из представленных на рис. 1 результатов следует, что исследуемые СД работают при средней и высокой инжекции электронов.

LED2 имеют более высокий коэффициент полезного действия — их мощность излучения примерно в три раза выше по сравнению с LED1 при тех же самых значениях прямого тока (рис. 1б). Наблюдаемое отличие в коэффициентах полезного действия, скорее всего, объясняется тем, что используемые нами гетероструктуры получены из разных источников и имеют различную исходную дефектность. В частности, из рис. 1а видно, что для LED1 наблюдается сдвиг ВАХ в область более высокого прямого напряжения, что свидетельствует о более высоком вкладе сопротивления омических контактов металл — полупроводник.

В области средней инжекции электронов наклоны ВАХ и ВтАХ для исследуемых СД идентичны. Это позволяет предположить, что закономерности

изменения мощности излучения и рабочего тока в области средней инжекции электронов не зависят (или слабо зависят) от ширины запрещенной зоны. С другой стороны в области высокой инжекции электронов наклон ВАХ и ВтАХ увеличивается с уменьшением ширины запрещенной зоны (рис. 1а). Эти предположения нуждаются в проверке на СД изготовленных из других материалов.

Далее рассмотрим изменение характеристик СД при облучении. Сопоставление ВФХ и ВАХ, измеренных до и после облучения гамма-квантами, показало, что практически отсутствуют заметные изменения в результате облучения во всем исследованном диапазоне доз. Это позволяет сделать вывод о том, что электрофизические характеристики активных слоев исследуемых гетероструктур при облучении остаются без изменений, также как и характеристики имеющихся контактов металл — полупроводник.

Облучения диодов гамма-квантами ^{60}Co не приводит к каким-либо заметным изменениям в спектрах излучения СД, кроме увеличения полуширины спектров. Поэтому наблюдаемое в резуль-

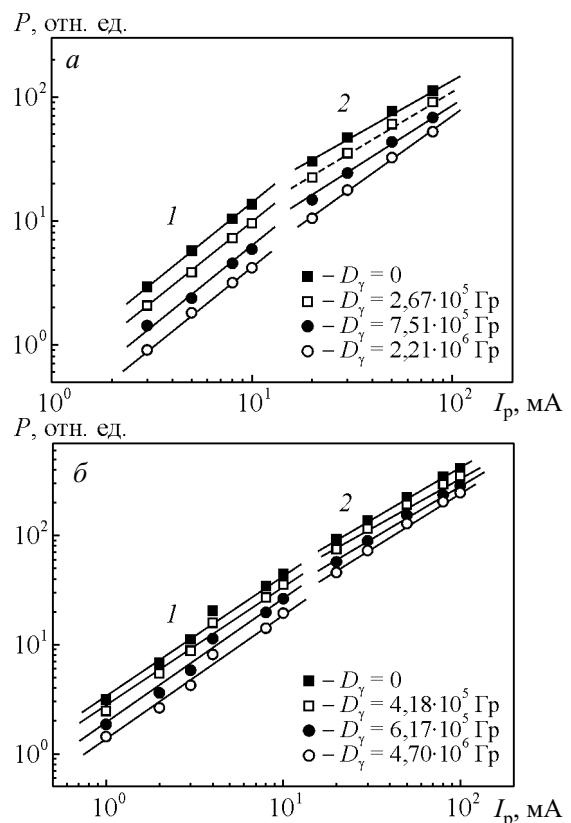


Рис. 2. Изменение ВтАХ LED1 (а) и LED2 (б) при облучении гамма-квантами: символы — результаты измерений; линии — установленные закономерности; 1 — средняя инжекция электронов; 2 — высокая инжекция электронов

тате облучения снижение мощности излучения, может быть обусловлено только введением центров безызлучательной рекомбинации в активный слой исследуемых гетероструктур.

На рис. 2 показано изменение ВтАХ при облучении для LED1 и LED2, которое зависит от плотности рабочего тока. Можно выделить области средней и высокой инжекции электронов (рис. 2, области 1 и 2), как и для исходных СД (рис. 1). Граница между выделенными уровнями инжекции электронов практически не зависит от дозы облучения. Облучение гамма-квантами приводит к снижению мощности излучения СД, но при этом наклон ВтАХ в области средней инжекции электронов при облучении остается неизменным и не зависит от плотности рабочего тока. В области высокой инжекции наблюдаемое при облучении снижение мощности сопровождается увеличением наклона ВтАХ, то есть падение мощности в данном случае дополнительно зависит и от плотности рабочего тока. Кроме того, из представленных результатов (рис. 2) видно, что большей ширине запрещенной зоны соответствует большее увеличение наклона ВтАХ.

Поскольку мы обнаружили различие в деградационных процессах наблюдаемых при различных уровнях инжекции электронов, то рассмотрим эти процессы более подробно. Для описания процессов происходящих при высокой инжекции электронов выберем рабочий ток 50 мА, а для средней инжекции — 5 мА. Изменение мощности излучения будем характеризовать нормированным значением мощности излучения P_γ/P_0 , где P_0 и P_γ — мощности излучения СД до и после облучения гамма-квантами, соответственно. На рис. 3 показано относительное изменение мощности излучения СД при различных значениях рабочего тока в результате облучения для LED1 и LED2. Видно, что изменение мощности излучения СД в зависимости от дозы облучения имеет достаточно сложный характер и зависит от уровня инжекции электронов.

При облучении СД гамма-квантами ^{60}Co снижение мощности излучения происходит прямо пропорционально дозе облучения и обратно пропорционально величине рабочего тока, при котором проводится измерение мощности излучения. Можно предположить, что подобные зависимости для исследуемых СД будут получены и при облучении быстрыми нейтронами, протонами и электронами различных энергий.

Радиационная стойкость исследуемых СД существенным образом зависит от уровня инжекции электронов, а в области сильной инжекции радиационная стойкость зависит и от плотности рабочего тока. Пред-

ставленные выше результаты позволяют обосновать выбор рабочего тока при разработке СД с заданной радиационной стойкостью на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами.

Снижение мощности излучения исследуемых диодов при облучении гамма-квантами ^{60}Co во всем диапазоне рабочих токов происходит в два этапа (на рис. 3 эти этапы разделены вертикальной пунктирной линией и обозначены цифрами I и II). Положение границы между выделенными этапами ($\sim 10^6$ Гр) практически одинаково для LED1 и LED2, не зависит ни от уровня инжекции электронов, ни от дозы облучения.

На первом этапе мы наблюдаем ярко выраженное насыщение деградационного процесса. Это позволяет предположить, что на данном этапе (рис. 3, область I — область малых доз облучения) под действием гамма-излучения происходит радиационная перестройка имеющейся дефектной структуры, о чем свидетельствует наблюдаемый эффект насы-

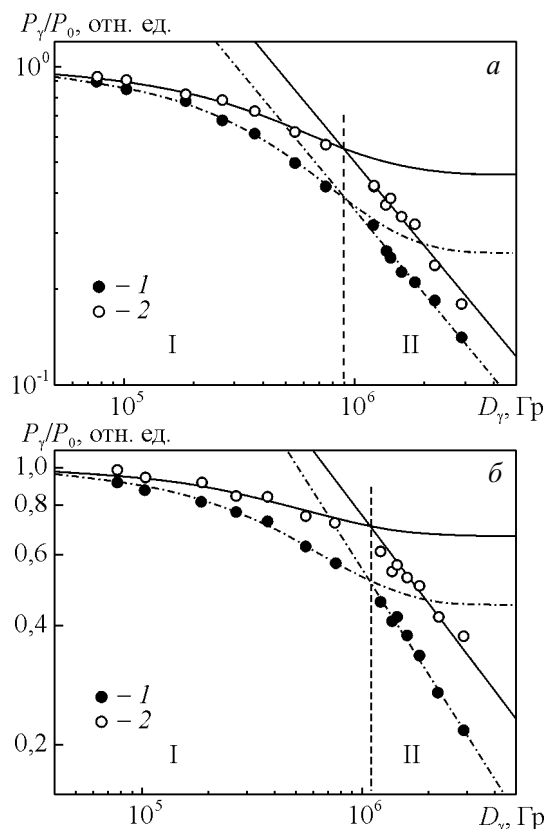


Рис. 3. Относительное изменение мощности LED1 (а) и LED2 (б) в области средней инжекции электронов (5 мА) и в области высокой инжекции электронов (50 мА) при облучении гамма-квантами ^{60}Co : символы — экспериментальные данные: 1 — 5 мА, 2 — 50 мА; линии — результат обработки; I — первый этап деградации процесса; II — этап деградации

щения деградационного процесса. Вводимые на данном этапе центры безызлучательной рекомбинации, ответственные за снижение мощности излучения (или дополнительные центры поглощения излучения), представляют собой комплексы, в состав которых входит дефект радиационного происхождения и уже имеющийся в активном слое СД дефект.

Снижение мощности излучения на первом этапе можно описать следующим соотношением

$$\frac{P_\gamma}{P_0} = A + B \cdot \exp(-K_{\gamma 1} D_\gamma), \quad (1)$$

где P_γ/P_0 — относительное изменение мощности излучения СД при экспозиционной дозе D_γ ; B — коэффициент пропорциональности, величина которого определяется концентрацией исходных дефектов, участвующих в радиационной перестройке (определяет вклад первого этапа в общий деградационный процесс); A — коэффициент пропорциональности, величина которого определяет вклад второго этапа деградационного процесса $A = 1 - B$, $K_{\gamma 1}$ — коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость введения радиационных дефектов (скорость перестройки имеющейся дефектной структуры) на первом этапе деградационного процесса при облучении гамма-квантами.

Из результатов, представленных на рис. 3 и соотношения (1) можно сделать вывод о том, что для исследуемых типов гетероструктур величина $K_{\gamma 1} = 5,3 \cdot 10^{-5} \text{ Гр}^{-1}$ не зависит от типа исследуемой структуры и уровня инжекции электронов, а также от плотности рабочего тока.

Коэффициент B , в свою очередь, зависит от типа исследуемой гетероструктуры, от уровня инжекции и от плотности рабочего тока в области сильной инжекции электронов. Фактически коэффициент B характеризует дефектность исходной структуры (чем больше B , тем больше дефектность). Если сопоставить результаты для двух типов СД на рис. 3, то можно сделать вывод, что СД с более высоким исходным КПД обладают большей радиационной стойкостью.

Меньшее значение КПД для исходных диодов LED1 является следствием более высокой дефектности используемой гетероструктуры.

В области больших доз (рис. 3, область II) снижение мощности излучения происходит вследствие введения центров безызлучательной рекомбинации (или центров поглощения излучения) чисто радиационного происхождения.

В этом случае относительное изменение мощности излучения СД можно описать следующим соотношением

$$\frac{P_\gamma}{P_0} = (K_{\gamma 2} D_\gamma)^{-\alpha}, \quad (2)$$

где $K_{\gamma 2}$ — коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость введения центров безызлучательной рекомбинации (или центров поглощения излучения) на втором этапе деградационного процесса; α — коэффициент пропорциональности.

Величина коэффициентов $K_{\gamma 2}$ и α зависит от типа исследуемой структуры, уровня инжекции электронов, от плотности рабочего тока, а также от исходной дефектности используемых гетероструктур.

Подобное поведение мощности излучения СД мы наблюдали нами ранее для СД на основе гетероструктур InGaN/GaN и GaN с множественными квантовыми ямами [8, 9], а также для СД на основе гетероструктур AlGaAs [10]. В частности, при исследовании влияния облучения электронами для СД на основе гетероструктур InGaN в [11] было установлено введение центров поглощения на основе комплексов [Mg-H] радиационного происхождения.

Представленные выше результаты исследований радиационной стойкости СД на основе AlGaInP с множественными квантовыми ямами позволяют предложить радиационную модель СД.

Снижение мощности излучения СД при облучении происходит в два этапа: на первом этапе снижение мощности обусловлено радиационной перестройкой имеющейся дефектной структуры, а на втором этапе — спад мощности обусловлен только введением радиационных дефектов. Для изложенной выше радиационной модели установлены соотношения (1) и (2), описывающие изменение мощности излучения в зависимости от экспозиционной дозы.

Установленные соотношения позволяют прогнозировать радиационную стойкость светодиодов, а также осуществить обоснование наиболее рациональных, с точки зрения радиационной стойкости, режимов эксплуатации СД.

Заключение

1. ВГАХ и ВАХ исходных СД, изготовленных на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами, позволяют выделить области средней и высокой инжекции электронов, при этом плотность тока, при которой выявляется граница между этими областями, не зависит от ширины запрещенной зоны в активном слое гетероструктуры.

2. Установлено, что закономерности изменения мощности излучения и рабочего тока при средней инжекции электронов не зависят (или слабо зависят)

от ширины запрещенной зоны, в то время как при высокой инжекции электронов наклон ВАХ и ВтАХ увеличивается с уменьшением ширины запрещенной зоны.

3. Величина мощности излучения СД при облучении гамма-квантами ^{60}Co в пассивном режиме питания уменьшается с ростом дозы облучения, при этом мощность излучения уменьшается прямо пропорционально дозе облучения и обратно пропорционально величине рабочего тока, при котором проводится измерение мощности. С ростом дозы облучения различия между средней инжекцией электронов и высокой инжекцией электронов возрастает.

4. Снижение мощности излучения СД при облучении гамма-квантами ^{60}Co обусловлено введением центров безызлучательной рекомбинации (или дополнительных центров поглощения излучения), при этом отсутствуют заметные изменения электрофизических характеристик активных слоев диодов и свойств контактов металл – полупроводник, точно также отсутствуют изменения в спектрах излучения.

5. Разработана радиационная модель СД на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами: деградация мощности излучения при облучении гамма-квантами происходит в два этапа: на первом этапе (область малых уровней воздействия) происходит введение центров безызлучательной рекомбинации (или центров поглощения излучения) вследствие радиационной перестройки имеющейся дефектной структуры; на втором этапе (область больших уровней воздействия) происходит снижение мощности излучения вследствие введения центров безызлучательной рекомбинации (или центров поглощения излучения) чисто радиационного происхождения.

6. Дефектность исходных гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами во многом определяет как эффективность работы исходных СД, так и их радиационную стойкость. При этом, чем выше эффективность работы СД тем выше их радиационная стойкость.

7. Сопоставление результатов исследований стойкости СД, изготовленных из различных полупроводниковых структур, позволяет предположить применимость описанной выше радиационной модели деградационного процесса для СД, изготовленных из различных полупроводниковых структур, при воздействии быстрых нейтронов, протонов, электронов и гамма-квантов.

Литература

1. Modak P., DiHondt M., Mijlemans P., Moerman I., Van Daele P., Demeester P. (Al)GaInP multiquantum well LEDs on GaAs and Ge. *Journal of electronic materials*, 2000, v. 29, no. 1, p. 80 – 85.
2. Кулаков В.М., Ладыгин Е.А., Шаховцев В.И. и др. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. Под ред. Е.А. Ладыгина. М.: Сов. радио, 1980, 224 с.
3. Градобоев А.В., Суржиков А.П. Радиационная стойкость СВЧ приборов на основе арсенида галлия. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2005, 278 с.
4. Рыжиков И.В., Селезнев Д.В. Исследование влияния нейтронного и гамма облучения на электрические характеристики и силу света $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$ гетероструктур с красным и желтым цветом свечения. *Технологии приборостроения*, 2005, № 4, вып. 16, с. 11 – 22.
5. Абрамов В.С., Рыжиков И.В., Селезнев Д.В. Исследование воздействия нейтронного и гамма облучения на вольт-люмен-амперные характеристики и параметры активной области мощных сверхярких $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$ с красным и желтым цветом свечения. В сб. “Информационные технологии в науке, технике и образовании”. Т. 3, М.: МГАПИ, 2005, с. 42 – 56.
6. Градобоев А.В., Орлова К.Н., Асанов И.А. Радиационная модель светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP. I. Облучение гамма-квантами ^{60}Co . Труды XXII Международной конференции “Радиационная физика твердого тела” (Севастополь, 9 – 14 июля 2012 г.), под редакцией Г.Г. Бондаренко. М.: ФГБНУ “НИИ ПМТ” – МИЭМ НИУ ВШЭ, 2012, с. 510 – 516.
7. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973, 416 с.
8. Градобоев А.В., Рубанов П.В. Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах: Труды V Международной научной конференции. – Томск, 2006. – С. 292 – 295.
9. Градобоев А.В., Вилисов А.А., Рубанов П.В., Асанов И.А. Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы докладов 7-й Всероссийской конференции. 1 – 3 февраля 2010 года. Москва. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, 2010, с. 207 – 208.
10. Градобоев А.В., Рубанов П.В., Скакова И.М. Деградация светодиодов на основе гетероструктур InGaIn/GaN при облучении гамма-квантами. *Изв. вузов. Физика*, 2011, № 1/2, С. 190 – 194.
11. Salvati G., Rossi F., Armani N., Pavesi N, Manfredi M., Meneghesso G., Zanoni E., Castaldini A., Cavallini A. Influence of long-term DC-aging and high power electron beam irradiation on the electrical and optical properties of InGaIn LEDs. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2004, v. 27, no. 1 – 3, p. 345 – 348.

Статья поступила в редакцию 26.11.2012 г.

Градобоев Александр Васильевич — Юргинский технологический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета, доктор технических наук, профессор, начальник лаборатории специфических испытаний ОАО «НИИПП» (г. Томск). Специалист в области физики конденсированного состояния, радиационной физики, исследований и испытаний полупроводников и полупроводниковых приборов. E-mail: gradoboev1@mail.ru.

Орлова Ксения Николаевна — Юргинский технологический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета, аспирант, ассистент кафедры. Специалист в области радиационной физики, исследований и испытаний полупроводников и полупроводниковых приборов.

Асанов Иван Александрович — ОАО «НИИПП» (г. Томск), старший научный сотрудник. Специалист в области исследований и испытаний полупроводников и полупроводниковых приборов.