

ВЛИЯНИЕ ВСТРОЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА СТОЙКОСТЬ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ К ОБЛУЧЕНИЮ ГАММА-КВАНТАМИ

© 2021 г. К. Н. Орлова^{1,*}, А. В. Градобоев^{2,3}, А. В. Симонова⁴, Ф. Ф. Жамалдинов²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия

³ Акционерное общество Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов, Томск, 634034, Россия

⁴ Федеральное государственное учреждение “Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности”, Москва, 107140, Россия

*e-mail: KNOrolova@mephi.ru

Поступила в редакцию 11.03.2022 г.

После доработки 23.03.2022 г.

Принята к публикации 29.03.2022 г.

В работе показано влияние встроенных электрических полей (на примере режима с и без разделения генерируемых облучением электронно-дырочных пар во встроенном электрическом поле р–п-перехода светоизлучающих диодов) на стойкость светодиодов, изготовленных на основе монокристаллического фосфида галлия ($\lambda = 655$ нм) при облучении гамма-квантами. Снижение мощности излучения в результате облучения гамма-квантами описано тремя стадиями. В работе выявлены возможные физические причины, которые послужили формированию указанных стадий снижения выходной мощности излучения светодиодов, изготовленных на основе GaP. Показано, что разделение электронно-дырочных пар в поле встроенного р–п-перехода повышает их стойкость, что подтверждается меньшими коэффициентами повреждаемости для I и II стадии снижения мощности для светодиодов с разделением генерируемых облучением электронно-дырочных пар во встроенном электрическом поле р–п-перехода во время облучения гамма-квантами.

Ключевые слова: светодиоды, GaP, радиационная стойкость, гамма-кванты, выходная мощность излучения

DOI: 10.56304/S2304487X21060080

1. ВВЕДЕНИЕ

Светоизлучающие и индикаторные диоды, световые табло и экраны, работающие на принципах электролюминесценции получили очень широкое распространение. Сфера применения данных устройств оптоэлектроники охватывает область разнообразной контрольно-измерительной техники, осветительной аппаратуры, а также космическую технику и ядерную энергетику. По условиям эксплуатации изделия оптоэлектроники могут подвергаться воздействию различных видов ионизирующего излучения, что требует знаний о закономерностях изменения параметров светодиодов (далее СД) под их воздействием.

СД на основе монокристаллического GaP в широком диапазоне давно освоены в условиях серийного производства [1–4]. При этом они по-прежнему остаются востребованными самыми разнообразными потребителями. Это, прежде всего, обусловлено тем фактом, что использование различных легирующих добавок позволяет

при выращивании GaP получать материалы для СД, работающих в широком диапазоне видимой области оптического спектра. Особенно широкое распространение получили распространение СД с красным свечением [4, 5]. Это вызвано тем, что красный цвет весьма удобен для индикации, позволяет создавать многоцветные системы отображения информации совместно с зеленым и красным цветами.

К настоящему времени сведения по воздействию ионизирующего излучения на данные СД разрозненны [6–8]. Для гарантированного обеспечения требуемых показателей стойкости к воздействию ионизирующего излучения необходимо знать основные закономерности изменения критериальных параметров СД в результате действия ионизирующего излучения [9–11]. Из литературных данных известно, что наличие встроенных и/или внешних электрических полей может приводить к заметному изменению скорости введения различных дефектов в активные слои полу-

проводниковых приборов [12–14]. При всем обилии самых разнообразных данных о стойкости данных СД к воздействию различных видов ионизирующего излучения, практически отсутствуют исследования по влиянию режима питания СД при облучении на их стойкость.

Целью работы является исследование влияния встроенных электрических полей на стойкость СД на основе монокристаллической структуры GaP с длиной волны излучения 655 нм к облучению гамма-квантами ^{60}Co .

2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Выбор СД на основе GaP с эффективной длиной волны 655 нм в качестве объекта исследований в данной работе обусловлен, в частности тем фактом, что для них характерны все основные виды излучательной рекомбинации, которые наблюдаются для СД на основе различных полупроводниковых материалов.

Рассмотрим подробнее получение исследуемых СД. GaP кристаллизуется в цинковой обманке с ребром элементарной кубической ячейки 5.4506 Å. Кратчайшее расстояние между центрами ядер элементов решетки GaP равно 2.36 Å, что составляет сумму атомных радиусов P (1.1 Å) и Ga (1.26 Å) [5].

GaP относится к непрямозонным полупроводникам, в которых вероятность межзонных переходов, происходящих с сохранением импульса, пренебрежимо мала, поэтому излучательная рекомбинация происходит, как правило, через примесные центры. Введение в GaP оптически активной изоэлектронной примеси позволяет значительно повысить вероятность излучательной рекомбинации в полупроводнике [11].

Промышленное получение монокристаллического GaP осуществлялось в две стадии: синтез — получение крупных поликристаллических слитков и выращивание монокристаллов по методу Чохральского из расплава, находящегося под слоем флюса. Монокристаллы GaP по параметрам делятся на несколько марок. Монокристаллы *n*-типа легируются Te или S или ничем не легируются, монокристаллы *p*-типа легируются Zn, монокристаллы высокоомного GaP легируются хромом или другими примесями с глубокой энергией залегания. Следует отметить, что в связи с условиями выращивания (высокая температура, высокое противодавление P, наличие флюса, отсутствие стойких контейнерных материалов) монокристаллы GaP характеризуются высоким уровнем неконтролируемых примесей ($\sim 5 \times 10^{16} - 1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$), а также высокой плотностью дислокаций (более 10^4 см^{-2}) [5].

При выращивании пластин GaP из раствора в качестве легирующей примеси использовали цинк и получаемый из Ga_2O_3 кислород [11].

Таким образом, были изготовлены кристаллы, которые затем монтировались в корпус ТО-18. В непрерывном режиме питания величина прямого рабочего тока достигала 100 мА, при этом напряжение питания не превышало 2.0 В. Максимум длины волны излучения находился в диапазоне около 655 нм.

Для проведения эксперимента использовалась моделирующая установка с мощностью дозы (100–200) Гр/с. Активным элементом в данной установке служит изотоп Co^{60} с эффективной энергией гамма-квантов 1.25 МэВ. Дозу облучения задавали временем облучения, используя данные об активности установки на момент проведения исследований. Погрешность измерений составляла не более 3% во всем объеме экспериментальных данных.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

До и после облучения измеряли вольт-амперные (ВАХ) и ватт-амперные (ВтАХ) характеристики СД. Измерения проводили при нормальных условиях в фотометрическом шаре с помощью измерительного комплекса, который позволял измерять прямое напряжение СД в диапазоне (0–5) В для диапазона прямых токов (0–500) мА с шагом 1 мА, при этом погрешность задания прямого тока от установленного уровня составляет $\pm 3\%$, а погрешность измерения мощности излучения СД — $\pm 5\%$.

Для СД первой партии электрические выводы при облучении были короткозамкнуты (далее КЗ). В этом случае, замкнуто встроенное электрическое поле *p–n*-перехода СД. Электронно-дырочные пары, генерируемые гамма-квантами, разделяются в области пространственного заряда (область *p–n*-перехода СД), при этом в нейтральном объеме СД разделения электронно-дырочных пар не происходит. Во второй партии СД электрические выводы были разомкнуты (далее О). В этом случае область пространственного заряда не формируется и разделения электронно-дырочных пар генерируемых гамма-квантами не происходит. Сопоставление результатов исследований данных партий СД позволит сделать вывод о влиянии встроенного электрического поля *p–n*-перехода СД на его стойкость к воздействию гамма-квантов. Исследование изменения формы ВтАХ в зависимости от дозы облучения позволит сделать вывод о влиянии плотности рабочего тока, при последующей эксплуатации, на стойкость СД к облучению гамма-квантами.

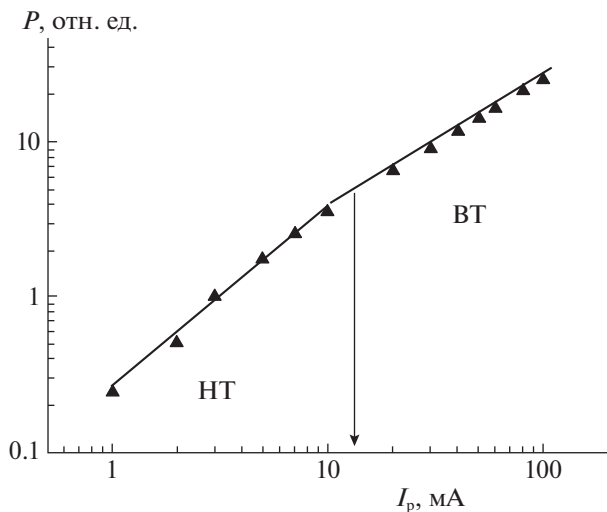


Рис. 1. Типичная ВтАХ исходных СД в двойных логарифмических координатах: НТ — область низких рабочих токов; ВТ — область высоких рабочих токов соответственно; символы — экспериментальные данные; линии — расчет по формуле (1); вертикальная стрелка — граница между выделенными областями рабочего тока.

Кроме того, в результате предварительных исследований было установлено, что материал, используемый для изготовления оптической линзы СД, не вносит дополнительного изменения в мощность излучения СД в результате облучения гамма-квантами в используемом диапазоне доз облучения. Это позволяет утверждать, что наблюдаемые в результате облучения гамма-квантами изменения мощности излучения будут обусловлены только изменениями светотехнических характеристик активной области СД.

Прежде всего, рассмотрим типичную ВтАХ для исходных СД, которая показана на рис. 1, построенную в двойных логарифмических координатах.

На основании анализа зависимости, представленной на рис. 1, можно сделать вывод о том, что исследуемые нами СД имеют типичную ВтАХ для СД данного типа. Ее можно характеризовать как зависимость с выраженной нелинейностью для данного диапазона рабочих токов. Кроме того, из представленных зависимостей можно сделать вывод о том, что средние значения ВтАХ для сформированных партий СД существенно не отличались. Следует отметить, что данные результаты позволяют выделить две характерные области рабочих токов (область низких токов — НТ и область высоких токов — ВТ, рис. 1). Видно, что каждая из выделенных областей характеризуется собственной зависимостью мощности излучения СД от рабочего тока.

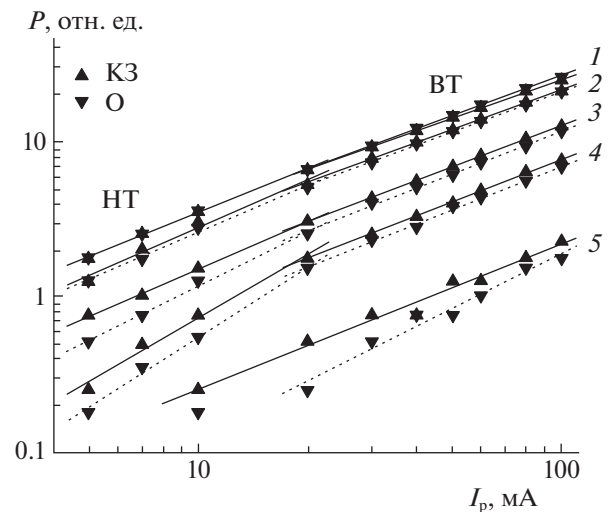


Рис. 2. Изменение ВтАХ партий “КЗ” и “О” при облучении гамма-квантами: 1 — $D_\gamma = 0$; 2 — $D_\gamma = 9 \times 10^3$ Гр; 3 — $D_\gamma = 1.46 \times 10^5$ Гр; 4 — $D_\gamma = 5.5 \times 10^5$ Гр; 5 — $D_\gamma = 2 \times 10^6$ Гр.

Рассмотрим более подробно изменение мощности излучения исследуемых СД при облучении гамма-квантами, которая измерена при рабочем токе 60 мА (данный режим питания является рекомендуемым по технической сопроводительной документации для эксплуатации исследуемых СД) (рис. 2). Здесь значение мощности излучения, измеренное после облучения нормировано на ее значение для исходных СД. Несмотря на незначительный разброс исходных ВтАХ, наблюдаемые изменения ВтАХ могут существенно отличаться, что и наблюдается для результатов, представленных на рис. 2.

Из представленных результатов видно, что с ростом дозы облучения гамма-квантами наблюдается не только снижение уровня мощности излучения СД, а также изменение наклона ВтАХ. При этом для областей НТ и ВТ наблюдаются свои характеристические закономерности, которые с увеличением дозы воздействия несомненно становятся выраженными. Особо отметим, что при достижении высоких уровней воздействия ВтАХ СД питания принимает линейную форму, что характерно для обоих режимов питания. Однако, скорость такого изменения для СД из партии “КЗ” заметно ниже чем для партии “О”. Таким образом результаты позволяют однозначно утверждать о более высокой стойкости СД из партии “КЗ”.

Рассмотрим более подробно снижение мощности излучения в результате облучения (рис. 3, 4) в нормированных на исходное значение мощности единицах. Анализ результатов, позволяет выделить три характерные стадии снижения мощно-

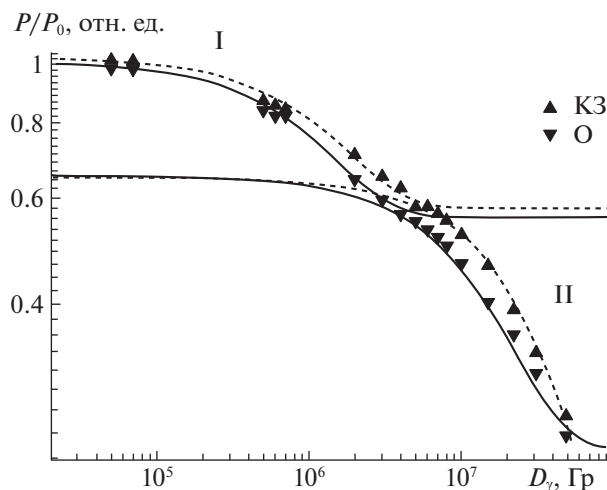


Рис. 3. Изменение мощности излучения на первой и второй стадиях снижения мощности излучения в результате облучения гамма-квантами СД партий "КЗ" и "О", измеренное при рабочем токе 60 мА. Линии — функции, описывающие выделенные стадии снижения мощности излучения СД.

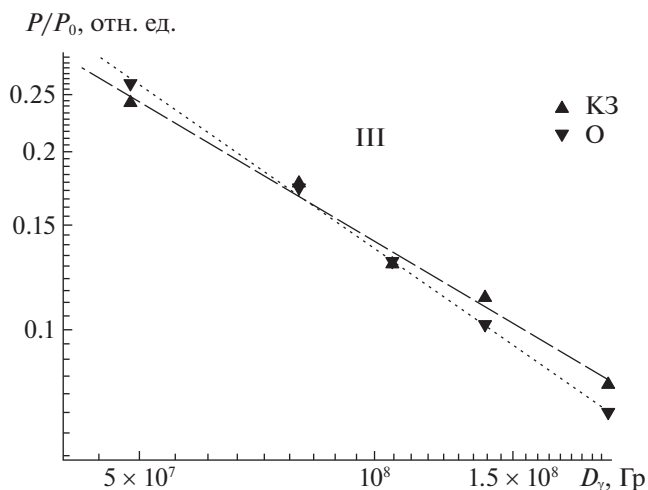


Рис. 4. Изменение мощности излучения на третьей стадии снижения мощности излучения в результате облучения гамма-квантами СД-партий "КЗ" и "О", измеренное при рабочем токе 60 мА. Линии — функции, описывающие выделенные стадии снижения мощности излучения СД.

сти излучения СД при облучении гамма-квантами. При этом, выявленные стадии снижения мощности излучения СД проявляются независимо от режима облучения, несмотря на то, что для каждой из рассматриваемых партий СД выявленные стадии описываются собственными закономерностями.

Можно предполагать, что в нашем случае первая стадия снижения мощности излучения СД в результате облучения гамма-квантами (стадия I, рис. 3) обусловлена радиационно-стимулированной перестройкой исходной дефектной структуры (дефект (комплекс дефектов) первого типа). В пользу предположения о радиационно-стимулированной перестройке свидетельствует тот факт, что данная стадия характеризуется насыщением, потому что именно дефектные комплексы принадлежащие собственно материалу из которого изготовлен СД имеют ограниченный процент от общей массы монокристаллического материала, поэтому кривая описывающая изменение мощности излучения в результате какого-либо внешнего воздействия выходит на насыщение. Т.е. в данном процессе снижения мощности излучения СД к радиационным дефектам, которые вводятся с определенной скоростью, требуется добавка существующего дефекта (или комплекса дефектов), концентрация которого ограничена. Подобную первую стадию мы наблюдали ранее [20]. Для исследуемых партий СД на первой стадии мы получаем практически идентичный коэффициент повреждаемости и достаточно близкие коэффициенты пропорциональности в выявленных характеристических зависимостях.

Суммируем основные результаты исследования изменения мощности излучения СД на первой стадии. Для СД партии "КЗ" наблюдается заметный рост соответствующей граничной дозы облучения гамма-квантами. Данный факт можно объяснить тем, что разделение генерируемых гамма-излучением электронно-дырочных пар в области пространственного заряда тормозит снижение мощности излучения на первой стадии. Это приводит к незначительному повышению вклада первой стадии и к заметному росту граничной дозы, которая разделяет первую и вторую стадии. При этом, коэффициент повреждаемости на первой стадии практически не зависит от режима облучения. Для СД из партии "О" на второй стадии получили коэффициент повреждаемости идентичный коэффициенту повреждаемости, который был получен ранее для обеих партий на первой стадии снижения мощности излучения СД. Это, в принципе, позволяет отнести вторую стадию к стадии радиационно стимулированной перестройки исходной дефектной структуры (дефект (комплекс дефектов) второго типа). Тогда можно утверждать, что в радиационно стимулированной перестройке исходных дефектов при облучении гамма-квантами кроме радиационных дефектов участвуют как минимум два исходных дефекта (или два исходных комплекса дефектов). Аналогичное более высокое значение граничной дозы между второй и третьей стадиями снижения мощности излучения наблюдается для СД из партии "КЗ". Это свидетельствует о более высокой стойкости СД партии "КЗ" к облучению гамма-квантами. Это подтверждается тем, что для СД из

партии “КЗ” мы получили заметно меньший коэффициент повреждаемости на второй стадии.

Полученные результаты исследований позволяют определить вклад второй стадии снижения мощности излучения в общее снижение мощности исследуемых СД как разность нормированной мощности излучения для выявленных границ второй стадии (см. рис. 3).

Суммируем результаты, полученные для I и II стадий снижения мощности излучения СД. Представленные выше рассуждения позволяют сделать вывод о том, что данные стадии являются составными частями одной и той же стадии, обусловленной радиационно-стимулированной перестройкой исходной дефектной структуры. При этом каждая из стадий связана с собственным дефектом (собственным комплексом дефектов). При этом, разделение генерируемых гамма-излучением электронно-дырочных пар приводит к снижению вклада первой стадии в общее снижение мощности излучения и к соответствующему заметному сдвигу границы между I и II стадиями в область более высоких доз облучения. Кроме того, разделение генерируемых электронно-дырочных пар на данных стадиях снижения мощности излучения позволяет существенно повысить стойкость СД к облучению гамма-квантами.

Третья стадия снижения мощности излучения СД (рис. 4) может быть однозначно связана с введением радиационных дефектов, об этом свидетельствует линейная зависимость характеристической кривой. Следует особо отметить, что при достижении третьей стадии снижения мощности излучения СД резко возросла вероятность развития катастрофических отказов, которые обусловлены появлением обрыва вследствие отсоединения кристалла СД от теплоотвода.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируем основные результаты и выводы, полученные в данной работе.

В результате исследования изменения мощности излучения СД, изготовленных на основе монокристаллического GaP ($\lambda = 655$ нм), при облучении гамма-квантами установлено влияние режима облучения (без и с разделением генерируемых облучением электронно-дырочных пар во встроенном электрическом поле $p-n$ -перехода СД). Более того, разделение электронно-дырочных пар в поле встроенного $p-n$ -перехода позволяет заметно повысить их стойкость. Снижение мощности излучения СД в результате облучения гамма-квантами может быть описано тремя характерными стадиями. Первая стадия обусловлена радиационно-стимулированной перестройкой первого исходного дефекта (комплекса дефектов) первого типа. Кроме того, наблюдается незначи-

тельное снижение относительного вклада первой стадии в общее снижение мощности при облучении. На второй стадии снижение мощности СД обусловлено радиационно-стимулированной перестройкой исходного дефекта (комплекса дефектов) второго типа. При этом разделение генерируемых гамма-излучением электронно-дырочных пар приводит к заметному сдвигу граничной дозы облучения, которая разделяет первую и вторую стадии снижения мощности излучения, в область более высоких доз облучения. Также более высокое значение граничной дозы между второй и третьей стадиями снижения мощности излучения наблюдается для СД из партии “КЗ”. Таким образом, разделение генерируемых в процессе облучения электронно-дырочных пар приводит к существенному повышению стойкости СД к воздействию гамма-квантов. На третьей стадии снижение мощности излучения СД обусловлено введением радиационных дефектов. В данном случае также наблюдается повышение стойкости СД для случая разделения генерируемых в процессе облучения электронно-дырочных пар. Данная стадия ограничена развитием катастрофических отказов, обусловленных появлением обрыва вследствие отсоединения (обрыва) кристалла СД от теплоотвода.

Исследование было выполнено при поддержке программы развития Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wilson D.J., Schneider K., Hönl S., Anderson M., Baumgartner Ya., Czornomaz L., Kippenberg T.J., Seidler P. Integrated gallium phosphide nonlinear photonics // *Nature Photonics*. 2020. V. 14. № 1. P. 57–62.
2. Гонтарук О.Н., Коваленко А.В., Конорева О.В., Мальный Е.В., Петренко И.В., Пинковская М.Б., Тартачник В.П. Электролюминесценция серийных светодиодов GaP в зеленой области спектра // *Журн. прикладной спектроскопии*. 2013. Т. 80. № 6. С. 859–863.
3. Фролов И.В., Радаев О.А., Сергеев В.А. Динамические характеристики и квантовая эффективность отдельных спектральных составляющих спектра излучения InGaN светодиодов // *Журн. радиоэлектроники*. 2018. № 9. С. 1–14.
4. John S. Different Types of in Light Emitting Diodes (LED) Materials and Challenges-A Brief Review // *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2018. V. 6. P. 4418–4420.
5. Коган Л.М. Светодиоды нового поколения для светосигнальных и осветительных приборов // *Новости светотехники*. 2001. № 7–8. С. 34–35.
6. Chang M.H., Das D., Varde P.V., Pecht M. Light emitting diodes reliability review // *Microelectronics Reliability*. 2012. V. 52. № 5. P. 762–782.
7. Brudnyi V., Prudaev I., Oleinik V., Marmaluk A. Electron irradiation degradation of AlGaInP/GaAs light-

- emitting diodes // *Physica status solidi (a)*. 2018. V. 215. № 8. P. 1700445.
8. *Gradoboev A.V., Bondarenko E.A., Varlachev V.A., Yemets E.G., Sednev V.V.* A Technique for Studying the Resistance of LEDs to Irradiation by Fast Neutrons at the IRT-T Reactor // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2021. V. 64. № 4. P. 619–622.
 9. *Сергеев В.А., Фролов И.В., Радаев О.А.* Связь параметров фототока светодиодов на основе GaN гетероструктур с изменением их характеристик при термотокковых испытаниях // *Журн. радиоэлектроники*. 2019. № 3. С. 1–7.
 10. *Брудный В.Н., Пешев В.В.* Влияние электронного (зарядового) состояния Е-ловушек на эффективность их накопления в *n*-GaAs при облучении // *Физика и техника полупроводников*. 2003. Т. 37. № 1.
 11. *Шуберт Ф.Е.* Светодиоды. 2008.
 12. *Orlova K.N., Gradoboev A.V.* Change in radiating power of the algaipn heterostructures under irradiation by fast neutrons // 2014 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. IEEE, 2014. P. 874–875.
 13. *Gradoboev A.V., Simonova A.V., Orlova K.N.* Influence of irradiation by ⁶⁰Co gamma-quanta on reliability of IR-LEDs based upon AlGaAs heterostructures // *Physica status solidi (c)*. 2016. V. 13. № 10–12. P. 895–902.
 14. *Градобоев А.В., Орлова К.Н., Арефьев К.П., Асанов И.А.* Исследование гетероструктур AlGaInP при облучении гамма-квантами в области перестройки дефектной структуры // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2013. V. 56. № 11–3. С. 116–119.

Vestnik Nacional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta "MIFI", 2021, vol. 10, no. 6, pp. 565–571

Effect of Build-In Electric Fields on the Hardness of GaP Light-Emitting Diodes to Gamma Irradiation

K. N. Orlova^{a, #}, A. V. Gradoboev^{b, c}, A. V. Simonova^d, and F. F. Zhamaldinov^b

^a *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

^b *Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia*

^c *Research Institute of Semiconductor Devices, Tomsk, 634034 Russia*

^d *Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, 115409 Russia*

[#]*e-mail: KNorlova@mephi.ru*

Received March 11, 2022; revised March 22, 2022; accepted March 29, 2022

Abstract—The effect of built-in electric fields on the hardness of light-emitting diodes (LEDs) based on monocrystalline gallium phosphide (wavelength of 655 nm) to gamma irradiation has been demonstrated for operating modes with and without separation of electron–hole pairs generated under irradiation in the built-in electric field of the *p–n* junction of a LED. Three stages of the light output power decreasing during gamma irradiation have been revealed. The possible physical reasons that served the formation of these stages of reducing the emission power of GaP LEDs have been discussed. It is shown that the separation of electron–hole pairs in the built-in field of the *p–n* junction increases their radiation hardness. This is confirmed by lower damage factors for stages I and II of power reduction for LEDs under the operating mode with the separation of electron–hole pairs generated under irradiation in the built-in electric field of the *p–n* junction under gamma irradiation.

Keywords: LEDs, GaP, radiation hardness, gamma irradiation, light output power

DOI: 10.1134/S2304487X21060080

REFERENCES

1. Wilson D.J., Schneider K., Hönl S., Anderson M., Baumgartner Ya., Czornomaz L., Kippenberg T.J., Seidler P. Integrated gallium phosphide nonlinear photonics. *Nature Photonics*. 2020, vol. 14, no. 1, pp. 57–62.
2. Gontaruk O.N., Kovalenko A.V., Konoreva O.V., Ma-lyj E.V., Petrenko I.V., Pinkovskaya M.B., Tartachnik V.P. Elektrolyuminescenciya serijnyh svetodiodov GaP v zelenoj oblasti spektra [Electroluminescence of GaP serial LEDs in the green region of the spectrum]. *Zhurnal prikladnoj spektroskopii*. 2013, vol. 80, no. 6, pp. 859–863. (in Russian)
3. Frolov I.V., Radaev O.A., Sergeev V.A. Dinamicheskie harakteristiki i kvantovaya effektivnost' ot del'nyh spektral'nyh sostavlyayushchih spektra izlucheniya InGaN

- svetodiodov [Dynamic Characteristics and Quantum Efficiency of Individual Spectral Components of the Emission Spectrum of InGaN LEDs]. *Zhurnal radioelektroniki*. 2018, no. 9, pp. 1–14. (in Russian)
4. John S. Different Types of in Light Emitting Diodes (LED) Materials and Challenges-A Brief Review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2018, vol. 6, pp. 4418–4420.
 5. Kogan L.M. *Svetodiody novogo pokoleniya dlya svetosignal'nyh i osvetitel'nyh priborov* [New generation LEDs for lighting and lighting devices] *Novosti svetotekhniki*. 2001, no. 7–8, pp. 34–35. (in Russian)
 6. Chang M.H., Das D., Varde P.V., Pecht M. Light emitting diodes reliability review. *Microelectronics Reliability*. 2012, vol. 52, no. 5, pp. 762–782.
 7. Brudnyi V., Prudaev I., Oleinik V., Marmaluk A. Electron irradiation degradation of AlGaInP/GaAs light-emitting diodes. *Physica status solidi (a)*. 2018, vol. 215, no. 8, p. 1700445.
 8. Gradoboev A.V., Bondarenko E.A., Varlachev V.A., Yemets E.G., Sednev V.V. A Technique for Studying the Resistance of LEDS to Irradiation by Fast Neutrons at the IRT-T Reactor. *Instruments and Experimental Techniques*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 619–622.
 9. Sergeev V.A., Frolov I.V., Radaev O.A. Svyaz' parametrov fototoka svetodiodov na osnove GaN geterostruktur s izmeneniem ih harakteristik pri termotokovyh ispytaniyah [Correlation between the Photocurrent Parameters of LEDs Based on GaN Heterostructures and Changes in Their Characteristics during Thermal Current Tests]. *Zhurnal radioelektroniki*. 2019, no. 3, pp. 1–7. (in Russian)
 10. Brudnyj V.N., Peshev V.V. *Vliyanie elektronnoego (zaryadovogo) sostoyaniya E-lovushhek na effektivnost' ih nako-pleniya v n-GaAs pri obluchenii* [Influence of the electronic (charge) state of E-traps on the efficiency of their accumulation in n-GaAs under irradiation] *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2003, vol. 37, no. 1, pp. 22–28 (in Russian).
 11. Shubert F.E. *Svetodiody* [LEDs]. Moscow, 2008. 495 p (in Russian).
 12. Orlova K.N., Gradoboev A.V. Change in radiating power of the algainp heterostructures under irradiation by fast neutrons. *2014 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology*. IEEE, 2014, pp. 874–875.
 13. Gradoboev A.V., Simonova A.V., Orlova K.N. Influence of irradiation by ⁶⁰Co gamma-quanta on reliability of IR-LEDs based upon AlGaAs heterostructures. *Physica status solidi (c)*. 2016, vol. 13, no. 10–12, pp. 895–902.
 14. Gradoboev A.V., Orlova K.N., Aref'ev K.P., Asanov I.A. *Issledovanie geterostruktur AlGaInP pri obluchenii gamma-kvantami v oblasti perestrojki defektnoj struktury* [Investigation of AlGaInP heterostructures under gamma-ray irradiation in the area of defect structure rearrangement] *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 11–3, pp. 116–119. (in Russian)