

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.28>

УДК: 621.383.933; 621.3.029.78

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ ALGAINP ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

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

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
115409, Москва, Каширское ш., д.31

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634034, Томск, проспект Ленина, 30

Статья поступила в редакцию 1 октября 2023 г.

**Аннотация.** Представлены результаты исследования деградации мощности излучения светодиодов AlGaInP красного (630 нм) цвета свечения при облучении быстрыми нейтронами. Исследование показало, что ВТАХ светодиодов характеризуется неравномерным падением мощности излучения, для эксплуатации светодиодов при высоких токах наблюдается меньшее снижение мощности и постоянный угол наклона характеризующей кривой, в то время как в области низких токов с увеличением флюенса нейтронов угол наклона описывающей этот процесс кривой растет. Особенностью исследуемых светодиодов для режимов *КЗ* (*пассивный режим питания с замкнутыми контактами*) и *Обрыв* (*пассивный режим питания с разомкнутыми контактами*) является восстановление мощности излучения на первом этапе облучения.

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

**Автор для переписки:** Ксения Николаевна Орлова, [KNOrlova@mephi.ru](mailto:KNOrlova@mephi.ru)

## Введение

Светодиоды на основе гетероструктур AlGaInP, состоящих из четверичного соединения с широкими прямыми энергетическими промежутками, являются материальной системой для оптоэлектронных приборов широкого спектра. Они используются в различных областях, таких как оптическая сигнальная обработка, комплектующие микросхем, системы видео слежения, сигнальные системы, лазерные принтеры и устройства записи и вывода информации. Зачастую необходимо применение указанных устройств в условиях повышенного уровня ионизирующего излучения [1-3]. Этими условиями могут быть объекты ядерно-топливного цикла, условия космического пространства и пр. Однако до сих пор недостаточно исследованы особенности деградации светодиодов AlGaInP под воздействием ионизирующего излучения. При этом существуют методики расчета и оценки радиационной стойкости для частных типов светодиодов при облучении определенным диапазоном воздействий и использовании для этого определенного вида излучения [2, 4].

### 1. Методика эксперимента

Для проведения исследования были использованы светодиоды на основе гетероструктур AlGaInP, полученные из различных источников. Кристаллы светодиодов были монтированы в стандартные корпуса *ТО-18*, а для формирования направленного пучка излучения использовалась линза из оптического компаунда *ПЭО-90МЭ*. Для исключения влияния облученного компаунда на объективную оценку результатов исследования было проведено предварительное его облучение. Этот эксперимент показал, что оптические свойства использованного оптического компаунда не изменялись при облучении нейтронами, что позволяет сделать вывод о том, что изменения в оптических свойствах светодиодов после облучения объясняются изменениями в активной области светодиодов.

Для минимизации влияния теплового отжига радиационных дефектов на результаты измерений, каждая партия светодиодов разделялась на части,

и каждая из них облучалась последовательно с различной интенсивностью, вплоть до флюенса  $\Phi_n = 10^{13}$  н/см<sup>2</sup>.

**Цель работы:** изучение деградации излучательной способности светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP при облучении быстрыми нейтронами.

В основном, изменение светового потока рассматривалось при рабочем токе  $I_p = 60$  мА, так как это установленное нормативными документами рабочее значение токов для светодиодов данного типа. Напряжение питания при этом не превышало  $U_{op} = 2.0$  В. Максимум длины волны излучения находился в диапазоне  $\lambda = 0.625-0.635$  мкм.

Для исследования радиационной стойкости СД к воздействию нейтронов было сформировано две партии. Первая партия была подвергнута воздействию нейтронов без влияния внутреннего электрического поля. Это достигалось за счет изоляции контактов. Вторая партия исследовалась на воздействие нейтронов с учетом влияния внутреннего электрического поля. Это достигалось за счет замыкания контактов.

Облучение нейтронами проводили на исследовательском реакторе ИРТ-Т (Исследовательский реактор тепловой-Томский).

Технические характеристики реактора:

- Замедлитель – вода;
- Отражатель – бериллий-вода;
- Мощность – 6 МВт;
- Плотность тепловых нейтронов –  $1,7 \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup>с;
- Плотность быстрых нейтронов –  $2,0 \cdot 10^{13}$  н/см<sup>2</sup>с.

Эксперимент проводили в канале со специальным фильтром, который позволял обеспечить облучение нейтронами с энергетическим спектром, идентичным по энергии к быстрым нейтронам. Облучение в обоих случаях проводили в пассивном режиме питания, то есть без наложения внешних электрических полей.

Обработка результатов исследования проводилась с помощью современного аналитического комплекса *Origin-Pro 2018*.

Ватт-амперная характеристика светодиода (далее – ВтАХ) показывает соотношение между силой тока, проходящего через светодиод, и мощностью излучения светодиода в относительных единицах [5]. Эта характеристика может использоваться для определения энергетической эффективности светодиода, которая зависит от его электрических и световых свойств и является основной светотехнической характеристикой светодиода. [6] По ВтАХ, возможно, определить мощность излучения для заданного значения прямого тока, а также линейный участок для модуляции излучения. Из ВтАХ светодиода также можно определить точку максимальной мощности, то есть значение тока, при котором светодиод излучает наибольшую световую мощность.

Таким образом, ВтАХ светодиода позволяет оценить его энергетическую эффективность и выбрать оптимальные режимы работы в зависимости от требуемой яркости свечения и долговечности.

## 2. Результаты и обсуждение

Во-первых, рассмотрим, как изменяется ВтАХ светодиодов при увеличении флюенса нейтронов.

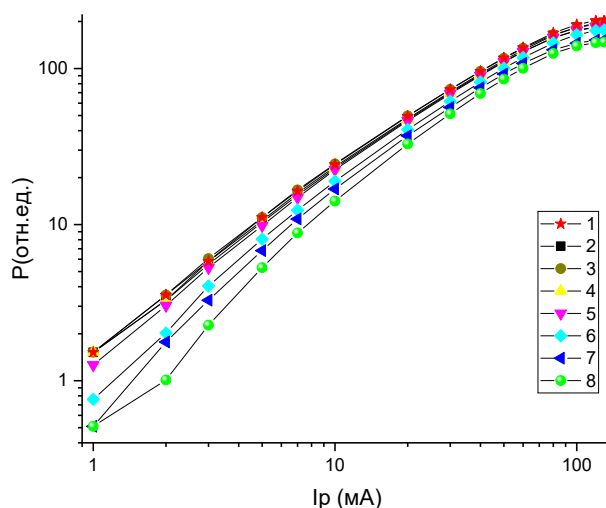


Рис. 1. ВтАХ светодиода типа AlGaInP (в режиме Обрыв) в логарифмических координатах, где: **1)**  $\Phi_n = 0$  н/см<sup>2</sup>, **2)**  $\Phi_n = 5 \times 10^{11}$  н/см<sup>2</sup>, **3)**  $\Phi_n = 7 \times 10^{11}$  н/см<sup>2</sup>, **4)**  $\Phi_n = 10^{12}$  н/см<sup>2</sup>, **5)**  $\Phi_n = 2 \times 10^{12}$  н/см<sup>2</sup>, **6)**  $\Phi_n = 5 \times 10^{12}$  н/см<sup>2</sup>, **7)**  $\Phi_n = 7 \times 10^{12}$  н/см<sup>2</sup>, **8)**  $\Phi_n = 10^{13}$  н/см<sup>2</sup>.

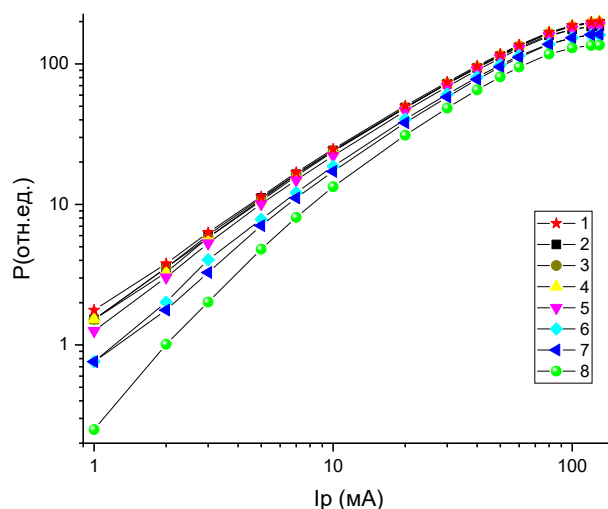


Рис. 2. ВТАХ светодиода типа AlGaInP (в режиме КЗ) в логарифмических координатах, где: **1)**  $\Phi_n - 0 \text{ н/см}^2$ , **2)**  $\Phi_n - 5 \times 10^{11} \text{ н/см}^2$ , **3)**  $\Phi_n - 7 \times 10^{11} \text{ н/см}^2$ , **4)**  $\Phi_n - 10^{12} \text{ н/см}^2$ , **5)**  $\Phi_n - 2 \times 10^{12} \text{ н/см}^2$ , **6)**  $\Phi_n - 5 \times 10^{12} \text{ н/см}^2$ , **7)**  $\Phi_n - 7 \times 10^{12} \text{ н/см}^2$ , **8)**  $\Phi_n - 10^{13} \text{ н/см}^2$ .

На рис. 1 и рис. 2 видно, что ВТАХ светодиодов деградируют с увеличением флюенса быстрых нейтронов. При этом падение мощности излучения нельзя считать равномерным, в области низких токов и в области высоких токов скорость деградации излучения в результате облучения различна. Для высоких токов характерно меньшее снижение мощности и сохранение до 5% относительной мощности излучения во всем диапазоне флюенсов нейтронов. ВТАХ при достижении высоких значений токов показывает «насыщение» кривой, это позволяет определить точку максимальной мощности, которая соответствует оптимальному режиму работы светодиода, ее значение лежит в диапазоне  $I = 68-72 \text{ мА}$ . Нелинейность ВТАХ обусловлена предельными возможностями по спонтанной рекомбинации носителей в р-п переходе из-за ограниченного их числа [7].

Как для светодиодов, облученных в режиме *Обрыв*, так и для светодиодов, облученных в режиме *КЗ* – ВТАХ показывают идентичные зависимости и закономерности. В области высоких токов зависимость падения мощности описывается линейной функцией, угол наклона которой сохраняется при воздействии во всем диапазоне флюенсов. Для области низких токов угол наклона при увеличении флюенса растет.

Для диапазона токов, в котором ВтАХ имеет линейный участок с углом наклона, характеризуемым внешней дифференциальной эффективностью стимулированного излучения, можно утверждать, что переходные процессы стабилизировались и в генерацию вовлечен объем активной области.

Далее рассмотрим изменение относительной мощности излучения (нормированной на исходное значение) исследуемых светодиодов при облучении на рис. 3 и рис. 4.

На основании представленных результатов, можно выделить две характерные стадии снижения мощности излучения (установленные закономерности выделены разным цветом), которые отличаются механизмом протекания тока. Снижение мощности излучения СД в результате облучения на первой стадии (I на рис. 3 и рис. 4) вызвано радиационно-стимулированной перестройкой исходной дефектной структуры, а именно дефектом (или комплексом дефектов) – об этом свидетельствует «насыщение» кривой, описывающей процесс с точностью 99,5%, поскольку дефектные комплексы, которые принадлежат материалу СД, имеют ограниченный процент от общей массы монокристаллического материала и независимость коэффициента повреждаемости от рабочего тока.

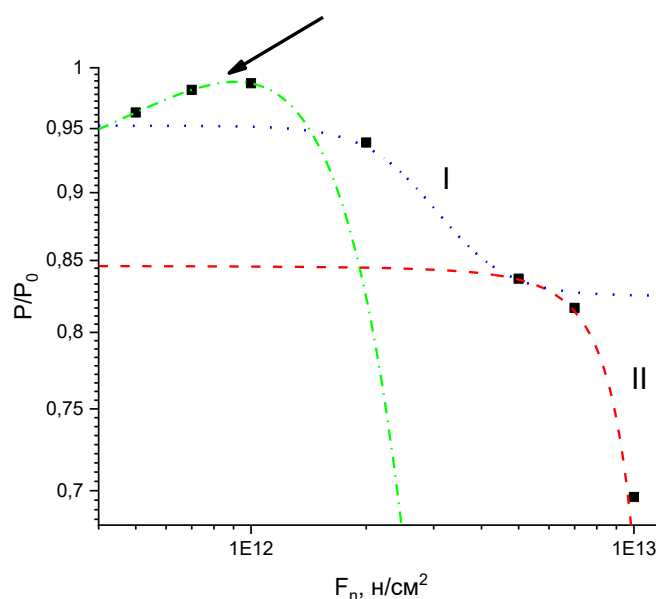


Рис. 3. Относительно снижение мощности светодиода на основе AlGaInP в режиме работы КЗ при рабочем токе 60 мА.

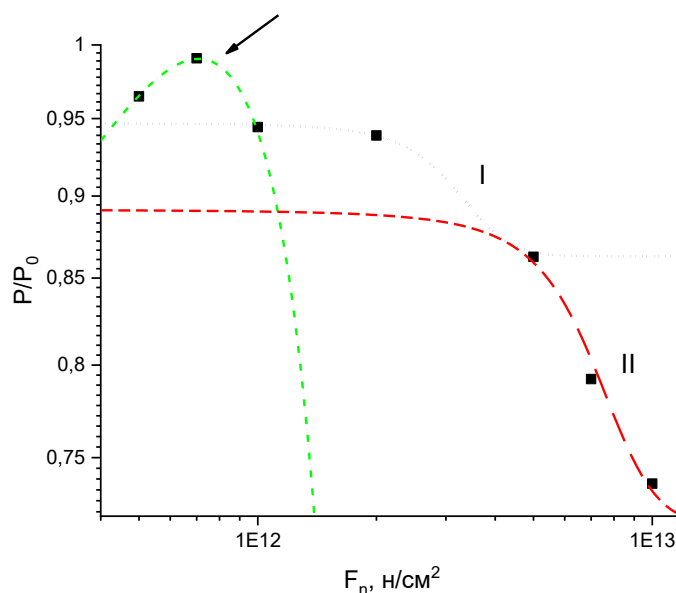


Рис. 4. Относительное снижение мощности светодиода на основе AlGaInP в режиме работы Обрыв при рабочем токе 60 мА.

В процессе снижения мощности излучения СД к радиационным дефектам, которые вводятся с определенной скоростью, требуется добавка существующего дефекта (или комплекса дефектов), концентрация которого ограничена [8]. На второй стадии (II на рис. 3 и рис.4), которая характеризуется отсутствием насыщения происходит введение дефектов чисто радиационного происхождения, что подтверждается неограниченным характером описывающей этот процесс кривой.

Стоит отметить, что, независимо от режима питания диодов при облучении, степень деградации светового потока прямо пропорциональна дозе облучения и обратно пропорциональна величине рабочего тока, при которой измеряется световой поток.

Для данного типа светодиодов для режимов КЗ и Обрыв наблюдается восстановление мощности излучения (на рис. 3 и рис. 4 показано стрелкой) при облучении флюенсами в диапазоне  $(5 \times 10^{11} - 2 \times 10^{12}) \text{ н}/\text{см}^2$ . Типичные значения уровня восстановления мощности излучения в данном случае составляют 5-7% от исходного значения.

Подобное явление объясняется релаксацией механических напряжений при частичном отжиге структурных дефектов под воздействием низких

флюенсов и наблюдалось ранее для некоторых полупроводниковых материалов [9-10].

При дальнейшем повышении уровня воздействия наблюдаются *I* и *II* стадии снижения мощности излучения, которые мы достаточно подробно рассмотрели выше.

## **Заключение**

По результатам исследования были выявлены особенности деградации излучательной способности светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP при облучении быстрыми нейтронами на примере изменения ВТАХ светодиодов и снижения относительной мощности излучения в результате облучения.

По проделанной работе можно сделать следующие выводы:

Изменения оптических свойств светодиодов после облучения объясняются изменениями в активной области светодиодов, ввиду того что оптические свойства использованного оптического компаунда не изменялись при быстром облучении нейтронами.

Для ВТАХ светодиодов характерно неравномерное падение мощности излучения, для высоких токов характерно меньшее снижение мощности и сохранение до 5% относительной мощности излучения во всем диапазоне флюенсов нейтронов.

ВТАХ при достижении высоких значений токов показывает «насыщение» кривой, что обусловлено предельными возможностями по спонтанной рекомбинации носителей в p-n переходе из-за ограниченного их числа.

ВТАХ в области высоких токов имеет линейный участок с постоянным углом наклона, характеризуемым внешней дифференциальной эффективностью стимулированного излучения, в области малых токов угол наклона ВТАХ растет с увеличением флюенса быстрых нейтронов.

Для данного типа светодиодов для режимов *КЗ* и *Обрыв* наблюдается восстановление мощности излучения на первом этапе облучения, что объясняется релаксацией механических напряжений при частичном отжиге



структурных дефектов под воздействием низких флюенсов. При дальнейшем повышении уровня воздействия наблюдаются *I* и *II* стадии снижения мощности излучения, что соответствует радиационно-стимулированной перестройке исходной дефектной структуры, и стадии введения дефектов чисто радиационного происхождения соответственно.

### Литература

1. Борисов А.В., Рекова П.И., Рябов В.И., "Исследование деградации световой мощности гетероструктур AlGaInP с квантовыми ямами под действием быстрых нейтронов". *Оптика и спектроскопия*. 2018. том 125, № 3, с. 428-432.
2. Зайцев С.Н., Разработка метода малых флюенсов для контроля и оценки радиационной стойкости светодиодов. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2013. № 6. С. 278-284.
3. Орлова К.Н., Градобоев А.В., Симонова А.В., Исследование изменения электрофизических характеристик светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP ( $\lambda = 624$  нм) с множественными квантовыми ямами при воздействии быстрых нейтронов. *Журнал радиоэлектроники*. 2016. №. 10. С. 6-6.
4. Можаяев, Р.К., Печенкин А.А., Уколов Д.С., Сравнение уровней стойкости полупроводниковых и органических светодиодов видимого диапазона к эффектам поглощенной дозы и структурным повреждениям. *Наноиндустрия*. 2021. Т. 14. № S7(107). С. 321-323.
5. Леготин С.А., Зайцев С.Н., Мурашев В.Н., Рыжиков И.В. Исследование характеристик AlInGaP светодиодов красного цвета свечения, облученных нейтронами и гамма-квантами. *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 5. С. 591.

6. Лакшин В.С., Вигдорович Е.Н. Влияние облучения на свойства излучателей на AlInGaN. *Международная научно-техническая конференция "Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике"*: Москва. 2017 / Под редакцией Булатова М.Ф.. Том 23 (XXIII). С. 100-102.
7. Brudnyi V.N., Prudaev I.A., Oleinik V.L., Marmaluk A.A. Electron Irradiation Degradation of AlGaInP/GaAs Light-Emitting Diodes. *Physica status solidi (a)*. 2018. Vol. 215, № 8. P. 1700445(5pp).
8. Градобоев А.В. и др. Исследование гетероструктур AlGaInP при облучении гамма-квантами в области перестройки дефектной структуры. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2013. Т. 56. №. 11-3. С. 116-119.
9. Gradoboev A., Orlova K. Investigation of AlGaInP heterostructures under gamma-irradiation in the field of restructuring defect structure. *Physica status solidi (c)*. 2015. Т. 12. №. 1-2. С. 35-38.
10. Мамонтов А.П., Чернов И.П. Эффект малых доз ионизирующего излучения [Текст]. *Дельтаплан*. Томск. 2009. – 288 с.

**Для цитирования:**

Орлова К.Н., Градобоев А.В., Расул А.Р. Особенности изменения мощности излучения светодиодов на основе соединений AlGaInP под воздействием быстрых нейтронов. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.28>