

УДК 621.383.933:621.3.029.78

АНАЛИЗ ВАТТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Р. Расул¹, К.Н. Орлова^{1,*}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

*e-mail: KNOrlova@mephi.ru

Поступила в редакцию: 11.11.2023

После доработки: 15.01.2024

Принята к публикации: 23.01. 2024

В работе показан анализ изменения формы ватт-амперных характеристик светодиодов, изготовленных из различных полупроводниковых структур AlGaInP, InGaN и GaP при изменении уровня инжекции неосновных носителей заряда в активную область светодиода. Показано, что мощность излучения является критериальным параметром светодиодов, основной светотехнической характеристикой и функцией от приложенного прямого тока. Для светодиодов на основе AlGaInP с множественными квантовыми ямами различного типа монтажа наблюдается существенное снижение мощности излучения для СД желтого цвета свечения. Для приборов на основе GaP наблюдается обратная зависимость. Высказано предположение о проявлении примесных центров в качестве центров безызлучательной рекомбинации. Показано, что с высокой точностью для всех типов светодиодов и изготовленных из различных полупроводниковых структур ватт-амперные характеристики описываются одной степенной функцией. Установлено, что показатель степени α в полученном соотношении определяет режим работы светодиода и характеризует квантовый выход индивидуального прибора и чувствительность фотодиода, используемого при измерениях в фотометрическом шаре и различен для различных диапазонов токов. Сделано предположение о различном поведении СД в указанных диапазонах токов при наличии каких-либо внешних воздействий (наработка, старение, длительная эксплуатация, радиационное воздействие).

Ключевые слова: светодиоды, ватт-амперная характеристика, выходная мощность излучения.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.308

EDN ZRTVZK

ВВЕДЕНИЕ

Светодиоды давно заняли существенное место в жизнедеятельности человека. Если в начале производства светодиодов их, как правило, использовали в качестве индикаторов, то сейчас полупроводниковый диод на основе p - n -перехода может полностью заменить освещение на основе ламп накаливания и в быту, и в специальных условиях [1, 2]. Разработчики постоянно совершенствуют светодиоды, контролируя при этом систему параметров и характеристик, таких как концентрация носителей заряда, концентрация примесей, вольт-амперная характеристика, вольт-фарадная характеристика, ватт-амперная характеристика, ватт-вольтная характеристика и др. [3–5]. Особое значение для разработчиков и потребителей представляет собой совершенствование основной выходной характеристики: ватт-амперной (далее – ВтАХ), которая является основой светотехнической и вольт-амперной характеристики, как основной электрофизической характеристики.

К настоящему времени имеется достаточно большое количество работ по исследованию влияния различных факторов на ВтАХ данных приборов. Исследованию зависимости прохождения электронов через p - n -переход посвящено множество работ [6, 7]. Однако недостаточно сведений о влиянии уровня инжекции на вид ВтАХ СД, в то время как обычно внимание исследователей уделяется исследованию электрофизических характеристик [8–9]. При этом присутствуют литературные данные, посвященные анализу ВтАХ определенного типа СД, но эти сведения не обладают общностью для всех типов СД, поэтому их можно считать разрозненными. В данной работе особое внимание будет уделено рассмотрению ВтАХ различных типов СД с точки зрения зависимости основной светотехнической характеристики от механизма протекания тока и уровня инжекции неосновных носителей заряда в активный слой.

На данный момент практически отсутствуют исследования взаимосвязи исходной формы

АНАЛИЗ ВАТТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ВтАХ СД радиационной стойкостью и надежностью этих приборов. На практике же существуют способы потенциальной отбраковки СД по их выходным характеристикам, т.е. наблюдаются различные формы ВтАХ, что говорит о зависимости вида ВтАХ и радиационной стойкости и надежности СД. Таким образом, результаты анализа формы ВтАХ различных типов СД, не подвергавшихся каким-либо воздействиям, будут в дальнейшем использованы для определения взаимосвязи вида ВтАХ СД и их радиационной стойкости и надежности и являются, несомненно, актуальными.

Целью работы является исследование изменения формы ВтАХ СД, изготовленных из различных полупроводниковых структур при изменении уровня инжекции неосновных носителей заряда в активную область СД.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В данной работе объектами исследования являлись промышленные СД видимого диапазона длин волн на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами и без (выводные и поверхностного монтажа), светодиоды на основе гетероструктур InGaN с множественными квантовыми ямами и на основе GaP. Все используемые в работе материалы представлены в табл. 1.

Таблица 1. Обозначения и характеристики используемых материалов

Тип	Материал	Обозначение	Цвет, длины волны
I	AlGaInP	I-1-Ж1	590 желтый
		I-1-Ж1_СМД	587 желтый
		I-1-Кр1	630 красный
		I-1-Кр1_СМД	624 красный
		I-2-Ж1	590 желтый
		I-2-Ж2	590 желтый
		I-2-Кр1	630 красный
II	InGaN	II-Б	465 белый
III	GaP	III-Ж	567 желтый
		III-Кр	693 красный

Далее рассмотрим более подробно используемые для изготовления СД полупроводниковые структуры, конструктивные особен-

ности и основные технологические приемы изготовления СД.

Для изготовления кристаллов СД на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами были использованы зарубежные двойные гетероструктуры AlGaInP типа Es-WLR05BB, ES-SMHRPN28 (красные), EsWUSOL5BC (красные), UED-MB028SOL-AU-02 (красные), ES-SMSOPN14 (красные), TK515UOH-G (красные), ODY08RF (желтые), EsWLY5BB (желтые) фирмы «EPISTAR».

Использование гетероструктур позволяет обеспечить наилучшие выходные параметры и эксплуатационные свойства СД [10, 11]. Поэтому при рассмотрении действия различных внешних факторов на СД мы уделим отдельное внимание стойкости гетероструктур, поскольку именно исходный полупроводниковый материал во многом определяет эксплуатационные свойства получаемых приборов [12, 13]. Именно исследование стойкости гетероструктур позволяет установить виды вводимых внешним воздействием дефектов и их комплексов и установить их влияние на основные характеристики гетероструктур.

Структуры AlGaInP фирмы EPISTAR, OSRAM, TYNTEK – выращены на монокристаллической кремниевой подложке толщиной 350 мкм. Сверху выращен буферный слой GaP толщиной 16 мкм. Далее был выращен активный слой AlGaInP с МКЯ, а затем верхний подконтактный слой InGaP, толщина которых составляла 1.8–2.0 мкм.

По типу конструкции исследуемые СД на основе AlGaInP делились на:

выводные (на базе корпусов КИ1 и КИ2), представлены под кодом I-1-Ж1 и I-1-Кр1;

СД поверхностного монтажа (I-1-Ж1_СМД и I-1-Кр1_СМД).

Для изготовления кристаллов СД на основе гетероструктур AlGaInP без множественных квантовых ям использовались гетероструктуры красного цвета свечения BL-L524UEC и гетероструктуры желтого цвета свечения BL-L524UYC, BL-L542UYC. Причем желтого свечения были выбраны светодиоды двух типов: I-2-Ж1 и I-2-Ж2 соответственно.

Данные СД обладают большим углом рассеяния светового потока благодаря тому, что излучающий кристалл расположен ближе к передней стенке линзы. Такой тип СД получил название Straw Hat («соломенная шляпа»), внешне напоминающий обычные цилиндри-

ческие двухвыводные СД, однако с меньшей высотой и увеличенным радиусом линзы.

Для всех исследуемых СД на основе гетероструктур на основе AlGaInP без множественных квантовых ям величина прямого рабочего тока составляет $I_{\text{раб}} = 30$ мА в непрерывном режиме питания, а напряжение питания при этом не превышало $U_{\text{раб}} = 2.5$ В. Все гетероструктуры СД красного свечения имели длину волны в максимуме спектра электролюминесценции $\lambda = 0.63$ мкм. В то же время все гетероструктуры СД желтого свечения имели длину волны в максимуме спектра электролюминесценции – $\lambda = 0.590$ мкм, что свидетельствует о близком элементном составе активного слоя.

Гетероструктуры с квантовыми ямами InGaN позволяют изготовить СД синего и зеленого свечения. Для изготовления СД белого свечения были использованы гетероструктуры InGaN синего свечения и люминофор для получения требуемого спектра излучения (П-Б).

Гетероструктуры InGaN/GaN с МКЯ были изготовлены методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке из сапфира толщиной 150 мкм. Буферный слой GaN формировался в условиях насыщения атмосферы водородом. Величина наращиваемого буферного слоя GaN составляла 3.5 мкм. Затем формировался активный слой с множественными квантовыми ямами в условиях насыщения атмосферы азотом. При формировании слоев использовались органические соединения TMGa, TEGa, TMIn, NH₃.

Для подложек эпитаксиальных структур светодиодов на основе GaP (III-Ж и III-Кр) использовались монокристаллы фосфида галлия GaP(Zn,O), выращенные методом Чохральского. Этот метод для данных кристаллов является наиболее эффективным [11]. Легирование азотом и/или цинком и кислородом применяется в зависимости от получения необходимого цвета свечения. Исторически сложилось так, что именно на материале GaP отработывалась методика оценки радиационной стойкости полупроводниковых приборов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для каждого СД измеряли ВтАХ в фотометрическом шаре, который обеспечивает задание прямого тока СД в диапазоне (0 – 500) мА с шагом 1 мА и погрешностью не более ± 3 %. Измерение тока на выходе фото-

приемника измерялось с погрешностью измерения тока фотоприемника ± 2 %. На основании измеренного тока фотоприемника производили расчет мощности излучения, используя калибровочные зависимости чувствительности фотоприемника от длины волны излучения.

Рассмотрим подробно ВтАХ СД из различных материалов. Для всех СД наблюдаются отличия в выходной мощности излучения для приборов разного цвета свечения. На рис. 1 представлены ватт-амперные характеристики СД на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами. Для СД желтого ($\lambda = 590$) и красного ($\lambda = 630$) цвета свечения наблюдается различие мощности излучения в два раза. Для СД желтого цвета свечения ($\lambda = 590$) наблюдается снижение мощности излучения, достигающее 25 % от СД красного цвета свечения ($\lambda = 630$). Таким образом, для исходных СД на основе AlGaInP с множественными квантовыми ямами различного типа монтажа наблюдается существенное снижение мощности излучения для СД желтого цвета свечения. Аналогичные зависимости наблюдаются для СД на основе гетероструктур AlGaInP без включения квантовых ям (рис. 2).

Для СД на основе GaP наблюдается обратная зависимость: для СД желтого цвета свечения на мощность излучения в области высоких токов и высоких напряжений на 40 % выше, чем у светодиодов красного цвета свечения с $\lambda = 693$ нм. В отличие от СД на основе гетероструктур AlGaInP, для изготовления СД на основе GaP желтого цвета свечения используется легирование одной примесью азотом, а для изготовления СД красного цвета свечения используются дополнительные примеси – цинк и кислород, что объясняет отмеченное различие в мощности излучения исходных СД.

Рассмотрим более подробно зависимости мощности излучения светодиода от протекающего в СД тока. В результате аппроксимации зависимостей мощности излучения от прямого тока всех типов СД было выявлено, что все кривые с высокой точностью описываются степенной функцией

$$P = A \cdot I_{\text{раб}}^{\alpha}, \quad (1)$$

где A – коэффициент пропорциональности, величина которого характеризует квантовый выход индивидуального СД и чувствительность фотодиода, используемого при измерениях в фотометрическом шаре; α – показатель степен-

АНАЛИЗ ВАТТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ной функции прямого тока, который зависит от области прямых токов, в которой рассматривается ВТАХ: $\alpha = 2$ – в области высоких

прямых токов; $\alpha = 1$ – в области средних значений прямых токов; $\alpha = 0$ – в области низких токов и, соответственно, низких напряжений.

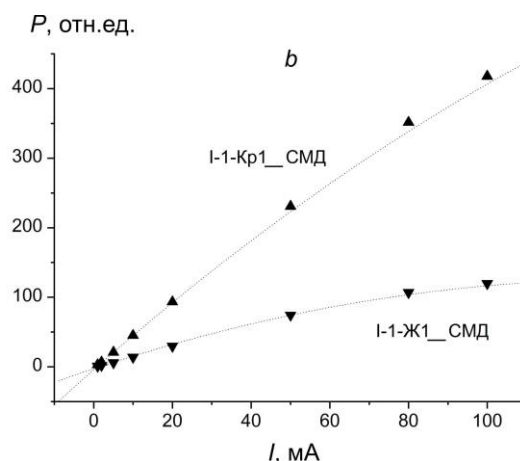
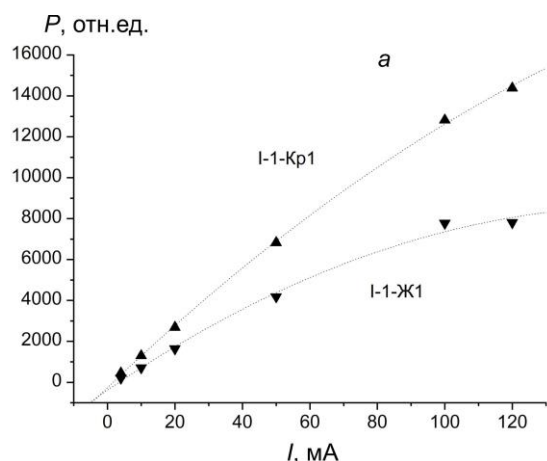


Рис. 1. ВТАХ исходных СД на основе AlGaInP: а) с множественными квантовыми ямами (I-1-Ж1 и I-1-Кр1); б) поверхностного монтажа (I-Ж1_СМД и I-1-Кр1_СМД) соответственно. Линии – функции, описывающие выделенные стадии снижения мощности излучения СД

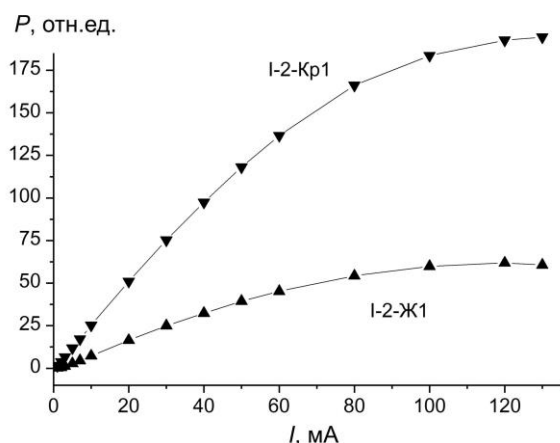


Рис. 2. ВТАХ исходных СД на основе AlGaInP (I-2-Ж1 и I-2-Кр1). Линии – функции, описывающие выделенные стадии снижения мощности излучения СД

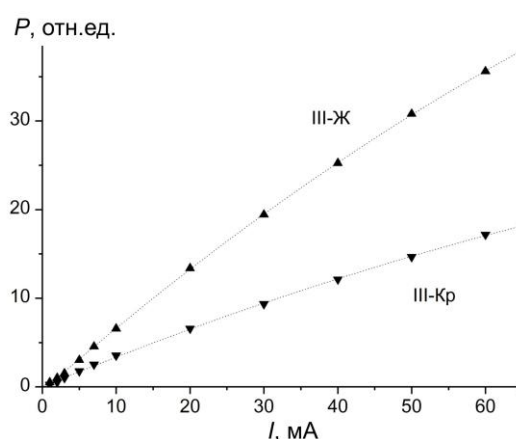


Рис. 3. ВТАХ исходных СД на основе GaP (III-Ж и III-Кр). Линии – функции, описывающие выделенные стадии снижения мощности излучения СД

Хочется отметить, что не для всех исходных СД наблюдается работа СД при $\alpha = 0$, когда мощность излучения СД есть величина постоянная и не зависящая от протекающего в СД тока. Указанное состояние описывает работу СД в режиме низкой инжекции электронов в активную область СД. Тогда можно сделать вывод, что при $\alpha = 1$ и при $\alpha = 2$ СД работает в режимах средней и высокой инжекции носителей заряда в активную область соответственно. Данное предположение было подтверждено расчетами концентрации инжек-

тируемых электронов и концентрации дырок в p -области.

Как было показано ранее, ВТАХ, представленная в полулогарифмическом масштабе [16], также позволяет однозначно идентифицировать механизмы протекания прямого тока и выделить области со средним и высоким уровнем инжекции неосновных носителей в активный слой СД при прямом смещении [14]. Поэтому наиболее четко возможно выделить режим низкой инжекции электронов, используя логарифмический / полулогарифмический масштаб (рис. 4). Для большинства исходных при-

боров режим низкой инжекции не наблюдается ввиду высокого напряжения порога проводимости при относительно низкой чувствительности измерительной аппаратуры в диапазоне токов $0 \text{ мА} < I < 5 \text{ мА}$.

Рассмотрим более подробно ВТАХ в областях средних и высоких токов. На рис. 5 видно, что рост мощности излучения всех исследуемых образцов с ростом прямого тока наиболее точно описывается линейной функцией, что соответствует $P \sim I_{\text{раб}}$ и коэффициенту $\alpha = 1$ и подтверждает, что в указанном диапазоне токов приборы работают в режиме средней инжекции электронов.

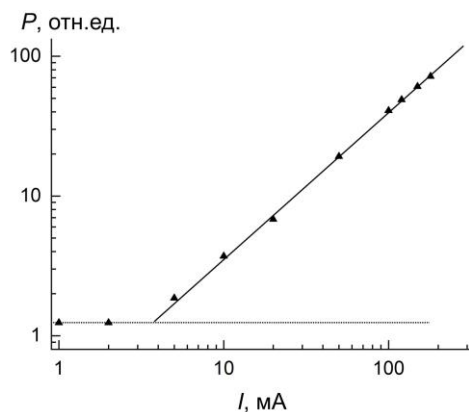


Рис. 4. ВТАХ исходных СД на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами: символы – экспериментальные данные; линии – установленные зависимости; горизонтальная пунктирная линия – уровень низкой инжекции электронов

На рис. 6 показаны ВТАХ исходных СД на основе AlGaInP, AlGaN и GaP в области высоких токов, мощность излучения которых изменяется в зависимости от рабочего тока по закону $P \sim I_{\text{раб}}^2$ и описывается формулой (1) при $\alpha = 2$.

Таким образом, при воздействии внешних факторов на СД необходимо более подробно рассматривать характеристики СД в трех областях инжекции электронов в активную область СД:

- сильной инжекции;
- средней инжекции;
- низкой инжекции.

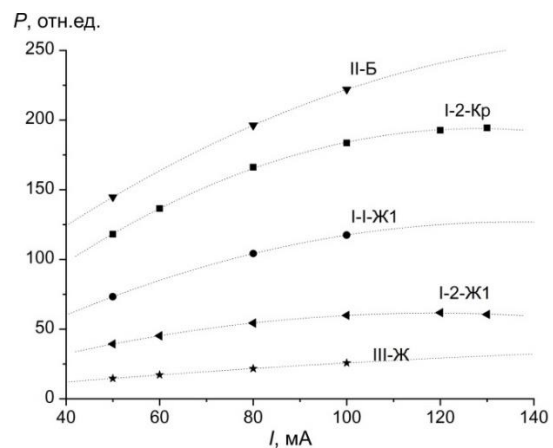


Рис. 6. ВТАХ исходных СД на основе AlGaInP, AlGaN и GaP в области высоких токов. Линии – функции, описывающие выделенные стадии снижения мощности излучения СД

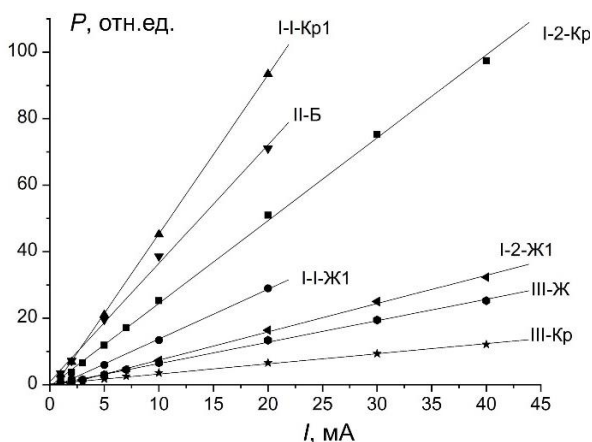


Рис. 5. ВТАХ исходных СД на основе AlGaInP, AlGaN и GaP в области средних токов. Линии – функции, описывающие выделенные стадии снижения мощности излучения СД

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании установленных закономерностей можно сделать следующие выводы:

1. ВТАХ СД, изготовленных из различных материалов, имеют различную исходную форму, причем мощность излучения является функцией от приложенного прямого тока, однако с высокой точностью описываются одной функцией.

2. ВТАХ СД позволяют выделить области низкой, средней и высокой инжекции неосновных носителей заряда в активную область СД. При этом область средней инжекции электронов характерна для всех типов СД, в то время как низкая и высокая инжекции наблюдаются для некоторых СД.

3. Мощность излучения СД изменяется по закону $P = A \cdot I_{\text{раб}}^\alpha$, причем показатель степени

АНАЛИЗ ВАТТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

α определяет режим работы СД и равен: $\alpha = 2$ – в области высоких токов; $\alpha = 1$ – в области средних токов; $\alpha = 0$ – в области низких значений токов. И возможно предполагать различное поведение СД в указанных режимах при наличии каких-либо внешних воздействий (наработка, старение, длительная эксплуатация, радиационное воздействие).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья написана без привлечения внешних источников финансирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонтарук О.Н., Коваленко А.В., Конорева О.В., Малый Е. В., Петренко И.В., Пинковская М.Б., Тартачник В.П. Электролюминисценция серийных светодиодов GaP в зеленой области спектра // Журн. прикладной спектроскопии, 2013. Т. 80. № 6. С. 859–863.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Chang M.H., Das D., Varde P.V., Pecht M. Light emitting diodes reliability review // Microelectronics Reliability, 2012. V. 52. № 5. Pp. 762–782.
6. Коган Л.М. Светодиоды нового поколения для светосигнальных и осветительных приборов // Новости светотехники, 2001. № 7–8. С. 34–35.
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. 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.
9. 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.
10. Шуберт Ф.Е. Светодиоды. М.: Физматлит, 2008. 495 с.
11. 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.
12. Orlova K.N., Gradoboev A.V. Investigation of AlGaInP heterostructures under gamma-irradiation in the field of restructuring defect structure // Physica status solidi (c), 2015. V. 12. Iss. 1–2. P. 35–38.
13. Градобоев А. В., Орлова К. Н., Асанов И. А. Дegradация параметров гетероструктур AlGaInP при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2013. № 2. С. 64–66.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2024, vol. 13, no. 1, pp. 52–58

ANALYSIS OF WATT-AMPERE CHARACTERISTICS OF LEDS MADE FROM VARIOUS MATERIALS

A.R. Rasul¹, K.N. Orlova^{1,*}

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409, Russia

*e-mail: KNOrova@mephi.ru

Received November 11, 2023; revised January 15, 2024; accepted January 23, 2024

The paper shows the changes in the watt-ampere characteristics shape of LEDs made from various semiconductor structures AlGaInP, InGaN and GaP with variation of the electron injection into the active region of the LED changes. It is shown that the light output power is a criterion parameter of LEDs, the main lighting characteristic and a function of the applied forward current. For LEDs based on AlGaInP with multiple quantum wells of various types of installation, a significant decrease in the emission power is observed for yellow LEDs. For GaP-based devices, an inverse relationship is observed. It has been suggested that impurity centers manifest themselves as nonradiative recombination centers. It is described with high accuracy for all types of LEDs by a

single power function. It has been established that the exponent α determines the LEDs operating mode and characterizes the light output power of an individual LED and the photodiode sensitivity used in measurements in a photometric sphere. It is different for various current ranges. It is assumed that LEDs behave differently in the specified current ranges in the presence of any external influences (operation, aging, long-term operation, radiation exposure).

Keywords: LEDs, watt-ampere characteristic, light output power.

REFERENCES

1. Gontaruk O.N., Kovalenko A.V., Konoreva O.V., Malyj E.V., Petrenko I.V., Pinkovskaya M.B., Tartachnik V.P. Elektroluminescenciya 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).
2. 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.
3. 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.
4. Frolov I.V., Radaev O.A., Sergeev V.A. Dinamicheskie karakteristiki i kvantovaya effektivnost' otdel'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).
5. 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.
6. 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).
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. Sergeev V.A., Frolov I.V., Radaev O.A. Svyaz' parametrov fototoka svetodiodov na osnove GaN geterostruktur s izmeneniyem ih karakteristik pri termotokovyh ispytaniyakh [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).
9. Brudnyj V.N., Peshev V.V. Vliyanie elektronogo (zaryadovogo) sostoyaniya E-lovushhek na effektivnost' ih nakopleniya 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).
10. Shubert F.E. Svetodiody [LEDs]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 495 p. (in Russian).
11. Gradoboev A.V., Orlova K.N., Arefev 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).
12. Orlova K.N., Gradoboev A.V. Investigation of AlGaInP heterostructures under gamma-irradiation in the field of restructuring defect structure //Physica status solidi (c), 2015. Vol. 12. No. 1–2. P. 35–38.
13. Gradoboev A.V., Orlova K.N., Asanov I.A. Degradaciya parametrov geterostruktur AlGaInP pri obluchenii bystryimi nejtronami i gamma-kvantami [Degradation of parameters of AlGaInP heterostructures under irradiation with fast neutrons and gamma rays]. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdejstviya na radioelektronnuyu apparaturu, 2013. No. 2. Pp. 64–66 (in Russian).