

УДК: 621.383.933:621.3.029.78

Методика определения светотехнических характеристик светодиодов

© 2025 г. К. Н. Орлова¹, А. В. Градобоев², А. В. Беклемишева³, А. Р. Аванесян¹

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

² Отделение экспериментальной физики «Национального исследовательского Томского политехнического университета», Томск, 634034, Россия

³ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, 123182, Россия

Представлена методика анализа светотехнических характеристик светодиодов (далее СД), которые даны широким спектром материалов группы АІІВV, с включением квантовых ям и без, на основе гетероструктур или с использованием монокристаллического материала. Данная методика предназначена для анализа и отбраковки СД, определения их индивидуальных коэффициентов пропорциональности, которые позволяют целенаправленно исследовать вызываемые различными разрушительными воздействиями деградиационные процессы в СД. Показано, что на ВтАХ (ватт-амперной характеристике) выделяются характерные области протекания рабочего тока: область низких токов НТ, область омического сопротивления, СД – R область, область высоких токов ВТ, которые характеризуются собственными коэффициентами пропорциональности и имеют свой физический смысл. Определены физико-математические соотношения, описывающие изменение выходной мощности излучения с ростом прямого тока для СД, изготовленных из перечисленных материалов. Рассмотрена применение настоящей методики с количественной оценкой потерь мощности излучения для выбранного типа СД в области НТ и ВТ. Показана зависимость потерь мощности излучения СД в области ВТ от рабочего тока. Представленная методика оценки светотехнических характеристик СД актуальна в случае воздействия спецфакторов (ионизирующее излучения, длительная эксплуатация, электрические поля и т.д.), где потери мощности излучения будут обусловлены индуцированным введением центров безызлучательной рекомбинации.

Ключевые слова: светодиоды, ватт-амперная характеристика, потери мощности излучения.

Введение

СД можно отнести не только к полупроводниковым приборам, которые широко используются в качестве излучателей в видимом и ИК-областях спектра, но и к эксплуатируемым во всевозможных условиях. К настоящему времени имеется множество источников, в которых довольно подробно рассказывается о применении СД, включая технологию производства и конструкцию, основные параметры и характеристики, а также систематизированы результаты исследования их потребительских свойств [1 – 2].

Подчеркнем, что много устройств на основе СД очень часто эксплуатируется в жестких условиях, например, в условиях космического пространства и на ядерных энергетических объектах [3 – 5]. В этих условиях они подвергаются воздействию различных видов ионизирующего излучения и эксплуатационных факторов, вследствие которых выходная мощность СД снижается, и появляются параметрические (в основном, снижение интенсивности излучения) и катастрофические отказы. При этом в космической, военной и атомных промышленности особое внимание уделяется проблемам их надежности и ради-

✉ К.Н. Орлова: KNOrlova@mephi.ru

Поступила в редакцию: 26.04.2025

После доработки: 15.08.2025

Принята к публикации: 28.08.2025

EDN SUKDFZ

ационной стойкости. Поэтому возможность восстановления деградирующих параметров СД является, несомненно, важным вопросом.

Один из способов восстановления параметров СД в результате облучения, а именно мощности, – радиационно-стимулированный отжиг, однако этот способ позволяет восстановить мощность не более, чем на 20 %. Поэтому основным эффективным способом планирования функционирования СД в жестких условиях является определение их радиационной стойкости, что невозможно без создания физико-математических соотношений, описывающих изменение критериальных параметров СД. Отметим, что существуют разрозненные результаты воздействия ограниченного набора флюенсов и доз на СД, изготовленные из определенных материалов [6, 7]. Однако отсутствует единая методика описания изменений в характеристиках СД, изготовленных из различных материалов, не только при воздействии спецфакторов, но и в их исходном состоянии. Создание качественной методики определения и анализа светотехнических характеристик СД и есть цель данной работы.

Важнейшие характеристики, которые можно получить, исследуя основную светотехническую характеристику СД (ватт-амперную характеристику (далее ВтАХ)), – это индивидуальные коэффициенты пропорциональности и пассивные потери мощности излучения, которые позволяют определить основные причины наблюдаемого как снижения, так и повышения мощности излучения и получить информацию при внешнем воздействии о физических механизмах, протекающих в активной области СД и замыкающих слоях, и информацию о формировании центров рассеяния и/или поглощения в элементах конструкции СД.

Цель работы: создание методики анализа ВтАХ СД для определения индивидуальных коэффициентов пропорциональности и потерь мощности излучения.

Для создания методики оценки светотехнических характеристик СД были взяты светодиоды, полученные из различных источников и изготовленные из различных материалов в условиях серийного производства. Отличительной особенностью части материалов активной области СД является присутствие в ней не только полупроводниковых гетероструктур, но и множественных квантовых ям, что также может иметь значение при оценке их радиационной стойкости [13, 14]. Для сравнения полученных результатов исследования были взяты СД на основе монокристаллического полупроводникового материала GaP. В табл. 1 представлены материалы и исходные спектрометрические характеристики исследуемых СД. По типу конструкции исследуемые СД делились на выводные (на базе корпусов КИ1 и КИ2) и СД поверхностного монтажа.

Типичная конструкция выводных СД (с выводными контактами) корпусного типа с полимерной герметизацией имеет корпус и линзу, изготовленные из оптического компаунда и предназначенные для формирования заданной диаграммы направленности излучения. Для изготовления выводных СД использовались металлические корпуса (КИ1 и КИ2) [9, 10]. Монтаж активного элемента СД формировался одновременно с корпусом и линзой из оптического компаунда. Для формирования направленного пучка излучения использовалась линза ПЭО-90МЭ.

СД с креплением на поверхность печатной платы (поверхностного монтажа) отличаются от выводных СД. Основа корпуса, на которую крепится кристалл, является хорошим проводником тепла, что улучшает отвод тепла от СД. Отметим, что данный факт, согласно литературным источникам, может иметь существенное влияние на радиационную стойкость СД [11, 12]. Иногда для создания нужной цветности между полупроводником и линзой присутствует слой люминофора для задания нужной цветовой температуры. В СД поверхностного монтажа с широким углом излучения линза отсутствует, а сам светодиод имеет форму параллелепипеда. СД поверхностного монтажа представлены под кодом IA590N2 и IA630N2, IB459, IB527 в табл. 1.

Светодиоды с характеристикой типа А и В являются светодиодами поверхностного монтажа, а С и D – выводными. Таким образом, представленное исследование позволило охватить СД с различной шириной запрещенной зоны, на основе гетероструктур и на основе монокристаллического материала, с различным квантовым выходом, с/без наличия квантовых включений. Однако все исследуемые материалы ограничены материалами, принадлежащими к группе материалов АПВВ.

Измерения ВтАХ СД проводились с помощью установки измерения статпараметров светодиодов POLI_500, типовая схема которой изображена на рис. 1.

Таблица 1. Характеристики и обозначения объектов исследования

Тип	I		II	
Активный слой	С множественными квантовыми ямами		Без квантовых ям	
Материал	AlGaInP	InGaN	AlGaInP	GaP
Характеристика типа СД	A	B	C	D
Обозначение	IA590N1, IA587N2, IA630N1, IA624N2	IB459, IB527, IB465	IC590, IC590, IC630	IID567, IID693
Длина волны, нм	590, 587, 630, 624	459, 527, 465	590, 590, 630	567, 693

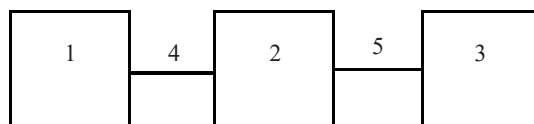


Рис. 1. Блок-схема установки POLI-500: 1 – компьютер; 2 – блок управления; 3 – фотометрический шар; 4 – кабель RS232; 5 – кабель питания

Принцип действия установки состоит в следующем:

- на исследуемый светодиод по управляющей программе подается прямой ток;
- измеряется падение напряжения на светодиоде;
- измеряется ток на выходе фотоприемника, который пропорционален мощности излучения исследуемого светодиода;
- результаты измерений передаются в компьютер по кабелю RS232 для дальнейшей обработки.

Рассмотрим методику анализа ВтАХ СД на примере IC630 СД на основе гетероструктур AlGaInP.

Напомним, что пассивные потери мощности можно выявлять как до воздействия различных внешних факторов (повышенная температура, внешние электрические поля, ультразвук, ионизирующее излучение и т.д.), так и во время и после воздействий.

На рис. 2 показана типичная ВтАХ для IC630 СД. Видно, что на ВтАХ можно выделить наблюдаемые ранее [15] характерные области протекания прямого тока, каждая из которых характеризуется собственной зависимостью мощности излучения активного слоя (кристалла) СД от величины рабочего тока.

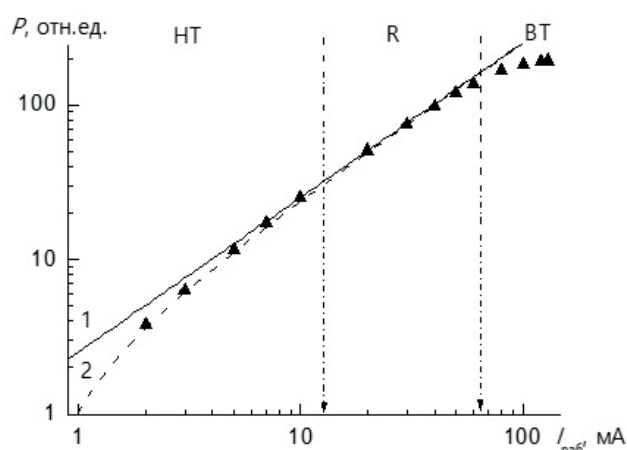


Рис. 2. Типичная ВтАХ IC630 СД на основе гетероструктур AlGaInP красного цвета свечения: символы – экспериментальные данные; вертикальные стрелки – границы между выделенными областями рабочих токов; 1 – расчет по соотношению (2); 2 – расчет по соотношению (4)

Напомним, что независимо от используемого полупроводникового материала, от наличия/отсутствия квантовых ям для всех типов исследуемых СД на прямой ветви ВАХ и ВТАХ были выделены:

область низких токов НТ – на прямой ветви ВАХ и ВТАХ наблюдается характерная нелинейная собственная закономерность роста рабочего тока и мощности излучения;

область средних токов R – прямая ветвь ВАХ описывается омическим сопротивлением, при этом для ВТАХ наблюдается рост с ростом рабочего тока;

область высоких токов ВТ – дополнительный спад мощности излучения за счет повышения температуры активного слоя СД.

1. Определение зависимости мощности излучения СД в области ОС СД от рабочего тока

На ВТАХ можно выделить идентичные области, которые практически совпадают с выделенными ранее на ВАХ [15]. Из представленных на рис. 2 результатов можно сделать вывод о том, что в области R ВТАХ может быть описана достаточно простым соотношением

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

где P – мощность излучения СД [отн. ед.]; $A = 2.75$ – коэффициент пропорциональности, величина которого характеризует квантовый выход индивидуального СД и чувствительность фотодиода, используемого при измерениях в фотометрическом шаре [отн. ед. P /ток фотодиода мА]; $I_{\text{раб}}$ – рабочий ток [мА].

2. Описание ВТАХ в области (НТ + R)

Вернемся к рис. 2. В области НТ наблюдается снижение мощности излучения СД по сравнению с мощностью излучения, которое рассчитано по соотношению (1). Предполагая, что это снижение обусловлено пассивными потерями мощности излучения ΔP , величина которых не зависит от рабочего тока, поскольку с ростом рабочего тока до области R вклад пассивных потерь становится пренебрежимо мал. Таким образом, получаем

$$\Delta P = A \cdot I_{\text{раб}} - P_{\text{изм НТ}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{изм НТ}}$ – мощность излучения, измеренная для области НТ.

Тогда все изменение мощности излучения СД в области (НТ + R) можно описать следующим соотношением:

$$P = A \cdot I_{\text{раб}} - \Delta P = 2.75 \cdot I_{\text{раб}} - 1.3. \quad (3)$$

Полученные таким образом для данного СД потери мощности в области НТ показаны на рис. 3. Потери мощности для данного типа СД в области НТ равны 1.30 отн. ед. и не зависят от величины рабочего тока.

Наблюдаемые на рис. 3 отклонения потерь мощности от среднего значения вполне объяснимы погрешностью измерений. Таким образом, наблюдаемые потери мощности можно считать константой, величина которой не зависит от рабочего тока.

Полученное соотношение (3) достаточно хорошо описывает изменение ВТАХ в области (НТ + R), как это показано на рис. 2. Оценка погрешности измерения величины пассивных потерь мощности излучения статистическим методом показала, что максимальная погрешность определения пассивных потерь не превышает 15 % для доверительной вероятности 0.95.

Если изменение мощности в области НТ в явном виде зависит от рабочего тока, а наблюдаемые отклонения нельзя объяснить погрешностью измерений, тогда изменение вклада потерь мощности можно описать наблюдаемой функцией и учесть в соотношении (3).

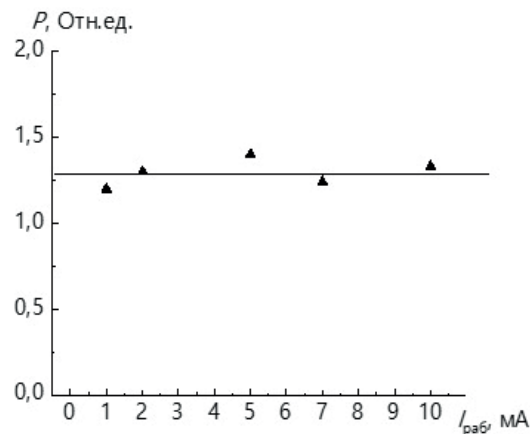


Рис. 3. Изменение потерь мощности в области НТ

3. Описание ВтАХ в области ВТ

Рассмотрим область ВТ. В данном случае с ростом рабочего тока наблюдается снижение рабочего напряжения, что обусловлено ростом температуры активного слоя и сопровождается снижением высоты барьера на р-п переходе СД, что приводит к снижению ширины запрещенной зоны [16, 17]. При этом наблюдается замедление роста мощности излучения с последующим повышением рабочего тока с ее последующим снижением (см. рис. 2).

Для того чтобы описать снижение мощности излучения СД в области ВТ-рассмотрим зависимость потерь мощности δP от рабочего тока, которые можно описать следующим образом:

$$\delta P = A \cdot I_{\text{раб}} - \Delta P - P_{\text{изм ВТ}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{изм ВТ}}$ – результаты измерений в области высоких токов.

На рис. 4 показана установленная зависимость δP в области высоких токов от рабочего тока, которая описывается следующим соотношением

$$\delta P = 0.0087 \cdot I_{\text{раб}}^2. \quad (5)$$

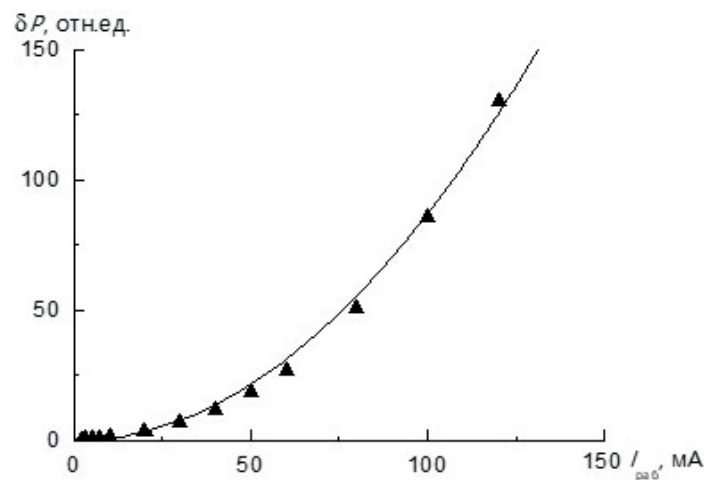


Рис. 4. Изменение потерь мощности в области ВТ в зависимости от рабочего тока

4. Описание ВТАХ во всем диапазоне рабочих токов

Таким образом, изменение ВТАХ во всем диапазоне рабочих токов можно описать следующим соотношением:

$$\begin{aligned} P &= 2.75 \cdot I_{\text{раб}} - 0.0097 \cdot I_{\text{раб}}^2 - 1.30 = A \cdot I_{\text{раб}} - B \cdot I_{\text{раб}}^2 - \Delta P = \\ &= A \cdot I_{\text{раб}} \cdot (1 - C \cdot I_{\text{раб}}) - \Delta P, \end{aligned} \quad (6)$$

где $B = 0.0097$ – коэффициент пропорциональности, величина которого определяет повышение температуры активной области СД и ее вклад в снижение квантовой эффективности; $C = 3.5 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент пропорциональности, величина которого определяет повышение температуры активной области СД.

На рис. 5 показано описание ВТАХ для рассматриваемого СД во всем диапазоне рабочих токов.

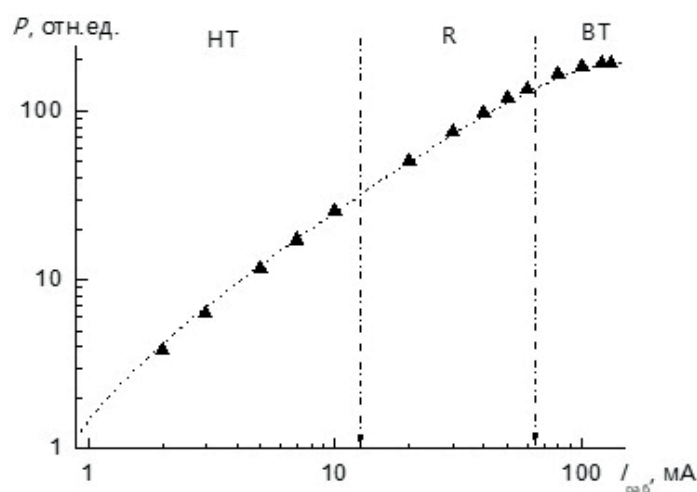


Рис. 5. Изменение ВТАХ во всем диапазоне рабочих токов: символы – экспериментальные данные; линия – расчет по соотношению (6)

Таким образом, учет пассивных потерь и снижения мощности излучения в области ВТ позволяет количественно описать наблюдаемую ВТАХ для индивидуального СД как до, так и после внешнего воздействия, на предмет которого проводятся испытания.

Полученные в результате применения настоящей методики коэффициенты пропорциональности для всех типов исходных СД и их исходные потери представлены ниже в табл. 2.

Таблица 2. Исходные сопротивления и напряжения отсечки СД

Тип СД	A	C	ΔP
IA590N1	2.88	0.012÷0.015	2.3
IA587N2	1.7÷1.95	0.006÷0.007	1.2÷2.6
IA630N1	7.96	0.021÷0.022	3.2÷3.7
IA624N2	4.7÷5.3	0.009÷0.014	2.3÷3.3
IB459	1.68÷.88	0.0072÷0.0078	0.04÷0.1
IB527	2.05÷2.2	0.008÷0.012	0.01÷0.1
IB465	4.02÷4.5	0.014÷0.024	0.4÷2.0
IC590N1	1.1÷1.3	0.0042÷0.0045	1.06÷2.06
IC590N2	0.57÷0.63	0.0029÷0.0035	0.53÷0.68
IC630	2.75÷2.96	0.010÷0.012	1.2÷2.1
IID567	0.55÷0.70	0.0016÷0.0033	0.3÷0.8
IID693	0.20 ÷ 0.35	0.00045 ÷ 0.0009	0.07 ÷ 0.09

Заключение

Установлено, что независимо от используемого полупроводникового материала, от наличия/отсутствия квантовых ям для всех типов исследуемых СД на ВтАХ можно выделить три характерные области рабочих токов: область низких токов НТ – на ВтАХ наблюдается характерная нелинейная собственная закономерность роста рабочего тока и мощности излучения; область средних токов R – для ВтАХ наблюдается рост с повышением рабочего тока, прямая ветвь ВАХ при этом описывается омическим сопротивлением; область высоких токов ВТ – дополнительный спад мощности излучения за счет повышения температуры активного слоя СД.

При анализе результатов воздействия таких различных внешних факторов, как ионизирующее излучение, длительная наработка, высокие температуры – использование изложенной ранее методики позволит предполагать основные причины наблюдаемого как снижения, так и повышения мощности излучения СД. Кроме того, установленные закономерности дают возможность определить пассивные потери мощности излучения СД и составить более достоверный прогноз стойкости СД к воздействию внешних факторов. Показанная в данной работе методика может быть использована для анализа работы всех известных типов СД.

Финансирование

Работа выполнена в рамках финансирования НИОКР «Разработка новых имплантационных методов получения диэлектрических промежуточных слоев в полупроводниковых подложках для систем управления термоядерных установок» № 25 от 09 января 2025.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

К.Н. Орлова – разработка концепции исследования, разработка методик измерения; постановка эксперимента; разработка математической модели; участие в проведении исследования и обсуждении результатов; подготовка текста статьи.

А.В. Градобоев – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования; участие в проведении исследования и обсуждении результатов.

А.В. Беклемишева – анализ нормативной базы; выполнение измерений; анализ экспериментальных данных; выявление закономерностей; подбор литературных источников, редактирование текста статьи.

А.Р. Аванесян – выполнение экспериментальных работ; обработка результатов; проведение численных расчетов; первичная обработка результатов исследования, выявление закономерностей; проведение расчетов и подготовка заключения.

Список литературы

1. Хайрулин Б.Д. Обзор основного светотехнического оборудования на аэродромах // Молодежь и системная модернизация страны, 2022. С. 230–233.
2. Закгейм А.Л., Иванов А.Е., Черняков А.Е. Особенности работы мощных AlInGaN-светодиодов при больших импульсных токах // Письма в Журнал технической физики, 2021. Т. 47. Вып. 16. С. 32–35.
3. Nakysbekov Z., Ismailov D., Bellucci S., Tukhfatullin T., Bogdanov O., Tronin B., Turmanova K., Suyundykova G., Grichshenko V., Pshikov M., Alzhanova A. Concise review of recent advances and applications of the electron linear accelerator ELU 4 in scientific and technical fields // Physical Sciences and Technology, 2024. V. 11. № 1–2. P. 32–42. DOI: 10.26577/PHST2024V11I1A4
4. Sulaiman N.N., Hasbullah N.F., Saidin N., Javed Y., Khan Z.I. Radiation-induced degradation in optoelectronic devices for satellite applications: a review // Discover Materials, 2025. V. 5. № 1. P. 1–22.
5. Polyakov A.Y., Pearton S.J., Frenzer P., Ren F., Liu L., Kim J. Radiation effects in GaN materials and devices // Journal of Materials Chemistry C, 2013. V. 1. № 5. P. 877–887.
6. 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. DOI: 10.1002/pssa.201700445.

7. Меишуров О.В., Таперо К.В., Фигуров В.С., Юрченков А.В., Авдюшкин С.А. Исследование деградации отечественных изделий оптоэлектроники вследствие структурных повреждений при воздействии ионизирующего излучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2011. № 2. С. 24–28.
8. Ионычев В.К., Шестеркина А.А. Исследование глубоких центров в микроплазменных каналах фосфидгаллиевых светодиодов зеленого спектра излучения // Физика и техника полупроводников, 2017. Т. 51. № 3. С. 386–389.
9. Градобоев А.В., Орлова К.Н., Асанов И.А. Деградация 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.
10. Романов Н.М., Мокрушина С.А. Влияние гамма-облучения на МДП-структуры с тонким оксидом Al₂O₃ // Перспективные материалы, 2018. № 2. С. 17–24.
11. Orlova K.N., Gradoboev A.V. Change in radiating power of the algaInP heterostructures under irradiation by fast neutrons // 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. IEEE, 2014. P. 874–875.
12. Бурмистров Е.Р., Авакянц Л.П., Афанасова М.М. Пьезоэлектрическая релаксация двумерного электронного газа в гетероструктурах с квантовыми ямами InGa_N/Ga_N // Известия высших учебных заведений, 2021. Т. 64. № 5. С. 9–19.
13. Расул А.Р., Орлова К.Н. Анализ ватт-амперных характеристик светодиодов, изготовленных из различных материалов // Вестник НИЯУ МИФИ, 2024. Т. 13. № 1. С. 52–58. DOI: 10.26583/vestnik.2024.308.
14. Генцарь П.А. Радиационно-стимулированная релаксация внутренних механических напряжений в гомоэпитаксиальных пленках фосфида галлия // Физика и техника полупроводников, 2006. Т. 40. № 9. С. 1051–1053.
15. Gradoboev A.V., Simonova A.V., Orlova K.N. Influence of irradiation by 60 Co gamma-quanta on reliability of IR-LEDs based upon AlGaAs heterostructures // Physica status solidi (C), 2016. V. 13. № 10–12. P. 895–902.
16. Pastuszak J., Węgierek P. Photovoltaic cell generations and current research directions for their development // Materials, 2022. V. 15. № 16. P. 5542. DOI: 10.3390/MA15165542.
17. Сергеев В.А., Ходаков А.М., Фролов И.В. Модель деградации InGa_N/Ga_N светодиода при токовых испытаниях с учетом неоднородного распределения температуры и плотности тока в гетероструктуре // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2020. Т. 12. № 3. С. 329–334.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2025, vol. 14, no. 5, pp. 431–439

Determining Method for Lighting Characteristics LEDs

K. N. Orlova^{1,✉}, A. V. Gradoboev², A. V. Beklemisheva³, A. R. Avanesyan¹

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

² Department of Experimental Physics, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia

³ National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, 123182, Russia

✉ KNorlova@mephi.ru

Received April 26, 2025; revised August 15, 2025; accepted August 28, 2025

The article presents a technique for analyzing the lighting characteristics of light-emitting diodes (hereinafter referred to as LEDs), which are represented by a wide range of materials of the AIII BV group, with or without quantum wells, based on heterostructures or using a single-crystal material. This technique is intended for analyzing and rejecting LEDs, determining their individual proportionality coefficients, which allow for a targeted study of degradation processes in LEDs caused by various destructive effects. It is shown that characteristic regions of the operating current flow are distinguished on the L-I characteristic: the region of low currents LC, the region of the ohmic resistance of the LED - R region, the region of high currents HC, which are characterized by their own proportionality coefficients and have their own physical meaning. Physical and mathematical relationships are determined that describe the change in the output radiation power with an increase in the forward current for LEDs made of the listed materials. The application of this technique with a quantitative assessment of radiation power losses for a selected LED type in the LC and HC regions is shown. The dependence

of the LED radiation power losses in the HC region on the operating current is shown. The presented method for assessing the lighting characteristics of LEDs is relevant in the case of exposure to special factors (ionizing radiation, long-term operation, electric fields, etc.), where losses in radiation power will be caused by the induced introduction of non-radiative recombination centers.

Keywords: LEDs, watt-ampere characteristics, radiation power loss.

References

1. Hajrulin B.D. Obzor osnovnogo svetotekhnicheskogo oborudovaniya na aerodromah [Overview of the main lighting equipment at airfields]. *Molodezh' i sistemnaya modernizatsiya strany*, 2022. Pp. 230–233 (in Russian).
2. Zakgejm A.L., Ivanov A.E., Chernyakov A.E. Osobennosti raboty moshchnykh AlInGaN-svetodiodov pri bol'shih impul'snykh tokakh [Features of operation of powerful AlInGaN LEDs at high pulse currents]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2021. Vol. 47. No. 16. Pp. 32–35 (in Russian).
3. Nakysbekov Z., Ismailov D., Bellucci S., Tukhfatullin T., Bogdanov O., Tronin B., Turmanova K., Suyundykova G., Grichshenko V., Pshikov M., Alzhanova A. Concise review of recent advances and applications of the electron linear accelerator ELU 4 in scientific and technical fields. *Physical Sciences and Technology*, 2024. Vol. 11. No. 1–2. Pp. 32–42. DOI: 10.26577/PHST2024V11I1A4
4. Sulaiman N.N., Hasbullah N.F., Saidin N., Javed Y., Khan Z.I. Radiation-induced degradation in optoelectronic devices for satellite applications: a review. *Discover Materials*, 2025. Vol. 5. No. 1. Pp. 1–22.
5. Polyakov A.Y., Pearton S.J., Frenzer P., Ren F., Liu L., Kim J. Radiation effects in GaN materials and devices. *Journal of Materials Chemistry C*, 2013. Vol. 1. No. 5. Pp. 877–887.
6. 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. Pp. 1700445. DOI: 10.1002/pssa.201700445.
7. Meshchurov O.V., Tapero K.B., Figurov V.S., Yurchenkov A.V., Avdyushkin S.A. Issledovanie degradatsii otechestvennykh izdelij optoelektroniki vsledstvie strukturnykh povrezhdenij pri vozdeystvii ioniziruyushchego izlucheniya [Study of degradation of domestic optoelectronic products due to structural damage when exposed to ionizing radiation]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnuyu apparaturu*, 2011. No. 2. Pp. 24–28 (in Russian).
8. Ionychev V.K., Shesterkina A.A. Issledovanie glubokikh centrov v mikroplazmennyykh kanalakh fosfidgallievyykh svetodiodov zelenogo spektra izlucheniya [Study of deep centers in microplasma channels of gallium phosphide LEDs of green emission spectrum]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2017. Vol. 51. No. 3. Pp. 386–389 (in Russian).
9. Gradoboev A.V., Orlova K.N., Asanov I.A. Degradatsiya 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 atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnuyu apparaturu*, 2013. No. 2. Pp. 64–66 (in Russian).
10. Romanov N.M., Mokrushina S.A. Vliyanie gamma-oblucheniya na MDP-struktury s tonkim oksidom Al₂O₃ [Effect of gamma irradiation on MIS structures with thin Al₂O₃ oxide]. *Perspektivnye materialy*, 2018. No. 2. Pp. 17–24 (in Russian).
11. Orlova K.N., Gradoboev A.V. Change in radiating power of the algaInP heterostructures under irradiation by fast neutrons. 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. IEEE, 2014. Pp. 874–875.
12. Burmistrov E.R., Avakyanc L.P., Afanasova M.M. P'zeoelektricheskaya relaksatsiya dvumernogo elektronnoy gaza v geterostrukturakh s kvantovymi yamami InGaN/GaN [Piezoelectric Relaxation of Two-Dimensional Electron Gas in InGaN/GaN Quantum Well Heterostructures]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij*, 2021. Vol. 64. No. 5. Pp. 9–19 (in Russian).
13. Rasul A.R., Orlova K.N. Analiz vatt-ampernykh kharakteristik svetodiodov, izgotovlennykh iz razlichnykh materialov [Analysis of watt-ampere characteristics of LEDs made of different materials]. *Vestnik NIYAU MIFI*, 2024. Vol. 13. No. 1. Pp. 52–58. DOI: 10.26583/vestnik.2024.308 (in Russian).
14. Gentsar' P.A. Radiatsionno-stimulirovannaya relaksatsiya vnutrennikh mekhanicheskikh napryazhenii v gomoepitaksial'nykh plenkach fosfida galliya [Radiation-induced relaxation of internal mechanical stresses in homoepitaxial gallium phosphide films]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2006. Vol. 40. No. 9. Pp. 1051–1053 (in Russian).
15. Gradoboev A.V., Simonova A.V., Orlova K.N. Influence of irradiation by 60 Co gamma-quanta on reliability of IR-LEDs based upon AlGaAs heterostructures [Model of InGaN/GaN LED degradation during current tests taking into account non-uniform temperature and current density distribution in the heterostructure]. *Physica status solidi (C)*, 2016. Vol. 13. No. 10–12. Pp. 895–902.
16. Pastuszak J., Wegierek P. Photovoltaic cell generations and current research directions for their development. *Materials*, 2022. Vol. 15. No. 16. Pp. 5542. DOI: 10.3390/MA15165542.
17. Sergeev V.A., Khodakov A.M., Frolov I.V. Model' degradatsii InGaN/GaN svetodioda pri tokovykh ispytaniyakh s uchedom neodnorodnogo raspredeleniya temperatury i plotnosti toka v geterostrukture [Model of InGaN/GaN LED degradation during current tests taking into account non-uniform temperature and current density distribution in the heterostructure]. *Radioelektronika. Nanosistemy. Informatsionnye tekhnologii*, 2020. Vol. 12. No. 3. Pp. 329–334 (in Russian).