

УДК: 621.383.933:621.3.029.78

Методика определения электрофизических характеристик светодиодов

© 2025 г. К. Н. Орлова¹, А. В. Градобоев², А. В. Беклемишева³, А. Р. Аванесян¹¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия² Отделение экспериментальной физики «Национального исследовательского Томского политехнического университета», Томск, 634034, Россия³ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, 123182, Россия

Представлена методика анализа электрофизических характеристик светодиодов (далее СД), изготовленных из различных полупроводниковых материалов группы $A^{III}B^V$ при воздействии таких внешних факторов, как ионизирующее излучение различных видов, длительная эксплуатация, повышенная температура, электрические поля и т.д. Данная методика предназначена для определения омического сопротивления СД и индивидуальных коэффициентов пропорциональности, которые позволяют целенаправленно исследовать деградационные процессы в СД. Показано, что на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) выделяются характерные области протекания рабочего тока: область низких токов (НТ), область омического сопротивления СД – R -область, область высоких токов (ВТ). Отмечено, что сублинейный участок прямой ветви ВАХ прибора с p - n переходом можно экстраполировать линейной зависимостью, наклон которой определяется его омическим сопротивлением. Определены физико-математические соотношения для омического сопротивления СД, изготовленных из любых материалов. Для исследуемых СД на основе материалов $AlGaInP$ (с множественными квантовыми ямами и без), $AlGaN$ с множественными квантовыми ямами и монокристаллического GaP при протекании прямого тока определены диапазоны напряжений отсечки. Представлена методика, которая может быть использована для анализа работы любых приборов, принцип работы которых основан на использовании p - n перехода и барьера Шоттки.

Ключевые слова: светодиоды, омическое сопротивление, вольт-амперная характеристика, радиационная стойкость.

Введение

Разработчики элементной базы и аппаратуры широко используют излучающие в видимом или ИК-диапазоне длин волн СД, как полупроводниковые приборы, составляющие основу полупроводниковой техники. Представителям заказчика зачастую необходима информация по воздействию основных видов проникающей радиации (нейтронов, электронов, протонов и гамма квантов) на электрические и светотехнические параметры и характеристики светоизлучающих структур. В настоящее время СД широко применяются не только в гражданской аппаратуре, но также в составе полупроводниковой базы ядерной энергетики и объектов ЯТЦ, гражданской авиации и космонавтики, ядерной радиоэлектроники и прочей бортовой аппаратуры [1–3].

Одним из важнейших параметров для этих областей применения является стойкость к действию проникающей радиации. СД группы $A^{III}B^V$ в настоящее время изготавливаются на основе различных материалов: GaP , $GaAs$, $InAs$, $InAsSb$, $GaSb$, $GaInSb$, $GaAsSb$, $GaAlSb$, $InGaAs$, $InGaAsP$, $GaAsP$, $AlGaAs$, $AlGaInP$, приборы на основе фосфида галлия сохраняют свое значение вследствие их повышенной

✉ К.Н. Орлова: KNOrlova@mephi.ru

Поступила в редакцию: 14.03.2025

После доработки: 25.07.2025

Принята к публикации: 30.07.2025

EDN ZKYOXG

радиационной стойкости [4–6]. Светоизлучающие структуры на основе фосфида галлия с красным и зеленым цветом свечения позволили создать обобщенную модель светодиода, что существенно ускорило развитие оптоэлектроники. Исследование радиационной деградации позволило уточнить модель GaP (Zn-O) светодиода [7, 8].

Создание качественной методики определения и анализа электрофизических характеристик СД позволяет не только определить величину изменения напряжения при изменении тока. Важнейшая характеристика, которую можно получить, исследуя ВАХ СД, – омическое сопротивление (далее ОС), которое позволяет получить информацию при внешнем воздействии о физических механизмах, протекающих не только в активной области СД (р-п переходе), замыкающих слоях, но и в контактах с приконтактными слоями.

Цель настоящей работы – разработка методики анализа ВАХ СД для определения омического сопротивления СД и индивидуальных коэффициентов пропорциональности.

1. Объекты исследований и используемое оборудование

Для проведения исследования были использованы СД, изготовленные из различных материалов в условиях серийного производства: СД видимого диапазона длин волн на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами и без, светодиоды на основе гетероструктур InGaN с множественными квантовыми ямами и на основе GaP.

По типу конструкции исследуемые СД делились на:

- **выводные** (на базе корпусов КИ1 и КИ2);
- **поверхностного монтажа** (далее ДПМ), представлены под кодом IA590N2 и IA630N2, IB459, IB527 в табл. 1.

Таблица 1. Обозначения объектов исследования

Тип	Активный слой	Материал	Характеристика типа СД	Обозначение	Длина волны (нм), цвет
I	С множественными квантовыми ямами	AlGaInP	А	IA590N1	590, желтый
				IA587N2	587, желтый
				IA630N1	630, красный
				IA624N2	624, красный
		InGaN	В	IB459	459, синий
				IB527	527, зеленый
				IB465	465, белый
II	Без квантовых ям	AlGaInP	С	IC590N1	590, желтый
				IC590N2	590, желтый
				IC630	630, красный
		GaP	D	ID567	567, желтый
				ID693	693, красный

Типичная конструкция СД с выводными контактами корпусного типа с полимерной герметизацией имеет корпус и линзу, изготовленные из оптического компаунда, предназначенные для формирования заданной диаграммы направленности излучения. Для изготовления выводных СД использовались металлические корпуса КИ1 и КИ2, различающиеся геометрическими размерами [9], а также технология формирования корпуса диода из оптического компаунда одновременно с линзой. Для формирования направленного пучка излучения использовалась линза из оптического компаунда ПЭО-90МЭ.

В случае использования металлических корпусов КИ методом термокомпрессионной сборки кристалл монтировался в металлический корпус, а затем на основе оптического компаунда ПЭО-90МЭ формировалась линза, предназначенная для формирования направленного пучка излучения СД. На

этапе предварительных исследований было установлено, что используемый компаунд не оказывает существенного влияния на спад светимости СД видимого диапазона при воздействии спецфакторов.

Исследуемые СД и их особенности и характеристики также представлены в табл. 1. Здесь же приведена используемая система обозначений объектов исследований.

Светодиоды с характеристикой типа А и В являются ДПМ, а С и D – выводными. Таким образом, в настоящем исследовании были охвачены СД с различной шириной запрещенной зоны, различным квантовым выходом, с наличием и без наличия квантовых фрагментов. Однако исследуемые материалы ограничены материалами, принадлежащими к группе материалов $A^{III}B^V$.

Омическое сопротивление СД R характеризует сопротивление, состоящее из суммы сопротивлений омических контактов $R_{ок}$, сопротивления активного слоя кристалла $R_{ас}$, омического сопротивления контакта кристалл – теплоотвод $R_{кт}$ и омического сопротивления электрических выводов $R_{эв}$:

$$R = R_{ок} + R_{ас} + R_{кт} + R_{эв}. \quad (1)$$

Таким образом, нарушение теплового контакта однозначно должно сопровождаться локальным ростом омического сопротивления.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Рассмотрим методику анализа ВАХ СД для определения омического сопротивления СД и индивидуальных коэффициентов пропорциональности на примере ИС590N1 СД на основе гетероструктур AlGaInP.

Определение электрофизических характеристик СД путем анализа прямой ветви ВАХ.

1. Измерение прямой ветви ВАХ и ВтАХ СД в заданном диапазоне рабочих токов.

Если диапазон рабочих токов не задан, то максимально допустимый рабочий ток для заданного режима эксплуатации определяют следующим образом:

- устанавливают исследуемый СД в измерительное устройство, постепенно повышают рабочий ток, измеряя при этом ВАХ, до полного отказа СД;
- повторяют данную процедуру для выборки СД (не менее 10 шт.);
- определяют статистическим методом среднее значение рабочего тока $I_{раб\text{ КО}}$ (КО – катастрофический отказ, вследствие которого СД выходят из строя);
- определяют величину максимально допустимого рабочего тока, как

$$I_{раб\text{ max}} = (0.7 - 0.75) \cdot I_{раб\text{ КО}}.$$

2. Нахождение характерных областей протекания рабочего тока ВАХ (рис. 1).

Такое представление ВАХ позволяет выделить три характерные области рабочих токов СД:

- область низких токов (НТ);
- область омического сопротивления активного слоя СД- R , где ВАХ СД имеет линейную форму;
- область высоких токов (ВТ).

При этом каждая из выделенных областей характеризуется собственной закономерностью изменения рабочего напряжения в зависимости от рабочего тока. Выявленные границы показаны на рис. 1 вертикальными стрелками.

Представленные ранее результаты позволяют сделать вывод о том, что в области R ВАХ СД определяется его омическим сопротивлением. При этом в области НТ ВАХ определяется нелинейным сопротивлением р-п перехода. В свою очередь, отклонение ВАХ в области ВТ (где сопротивление активной области СД минимально, и преобладает диффузионная составляющая тока, которая зависит от плотности распределения носителей заряда) можно объяснить ростом температуры активного слоя, что приводит к снижению ширины запрещенной зоны [10, 11].

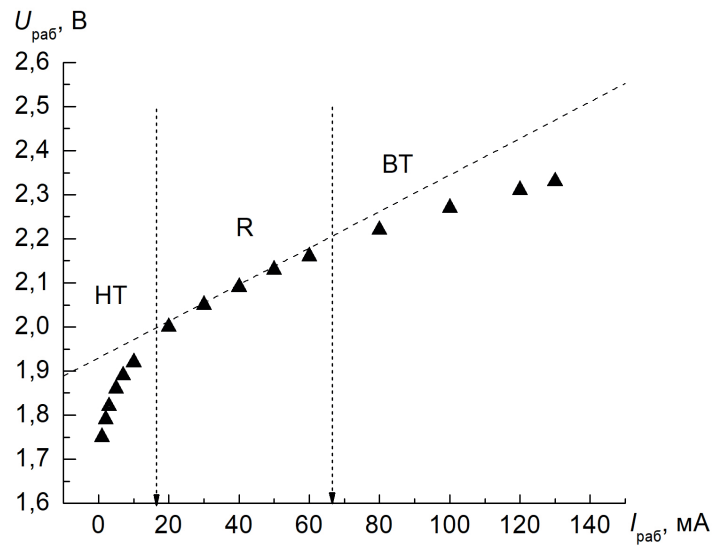


Рис. 1. Типичная ВАХ ИС590N1 СД на основе гетероструктур AlGaInP желтого цвета свечения ($\lambda = 590$ нм): символы – экспериментальные данные; пунктирная линия – расчет по формуле (2); вертикальные стрелки – границы между выделенными характерными областями рабочего тока

Аналогичные зависимости были выявлены для ВАХ всех исходных СД. Таким образом можно предполагать различное поведение приборов в областях НТ, R и ВТ.

3. ВАХ в области R описываем следующим физико-математическим соотношением:

$$U_{\text{раб}} = U_{00} + R_{\text{сд}} \cdot I_{\text{раб}}, \quad (2)$$

где $U_{00} = 1,92$ В – напряжение отсечки p - n перехода СД в данной системе координат; $R_{\text{сд}} = 7,25$ Ом – ОС СД в данной области; $I_{\text{раб}}$ – рабочий ток [А].

Величины U_{00} , $R_{\text{сд}}$ являются индивидуальными характеристиками СД и материала, из которого он изготовлен. На основе нескольких независимых измерений ВАХ одного и того же СД можно оценить величину доверительных интервалов для измеряемых величин статистическим методом. Предварительные исследования показали, что погрешность определения ОС СД не превышает $\pm 5\%$ при доверительной вероятности 0.95. Напряжение отсечки при этом определяется с точностью до $\pm 0,01$ В, и в большей степени характеризует полупроводниковый материал, из которого изготовлен СД.

Рассмотрим полученное в результате применения данной методики изменение ОС ИС590N1 СД на основе гетероструктур AlGaInP при воздействии гамма-квантов (рис. 2).

ОС СД монотонно растет, начиная с малых доз облучения. Следует отметить, что наблюдаемые при этом изменения ОС СД статистически значимы и не могут быть объяснены погрешностью измерений.

Контроль вольт-фарадной характеристик (далее ВФХ) показал, что в диапазоне используемых доз облучения отсутствуют изменения электрофизических характеристик активного слоя СД, что согласуется с известными литературными данными [12].

С другой стороны, в [13, 14] было показано, что при воздействии различных внешних факторов для СД наблюдается релаксация локальных механических напряжений, что приводит к ухудшению теплового контакта между кристаллом и теплоотводом.

В первой области наблюдается незначительный рост ОС. Второй этап характеризуется существенным повышением омического сопротивления. При этом после его роста на 20–30 % при облучении последующее облучение приводит к появлению области аномальных ВАХ, которая определяет вторую характерную область. При дальнейшем облучении развивается третья стадия появления катастрофических отказов.

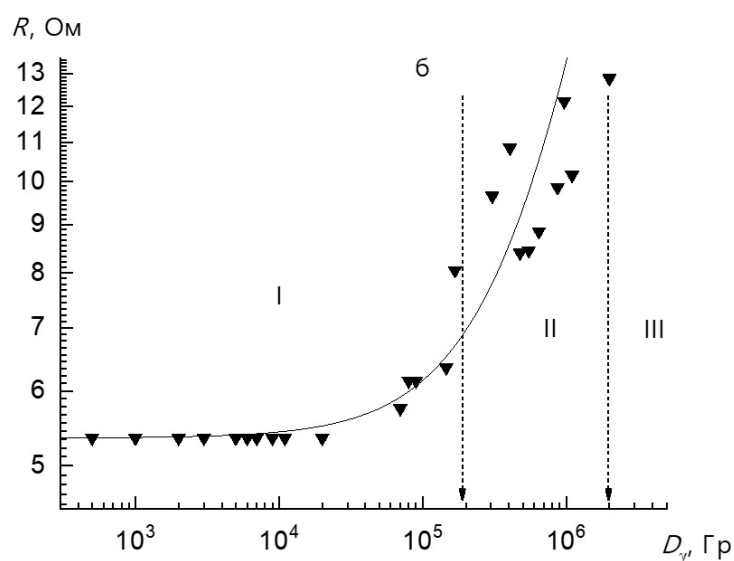


Рис. 2. Изменение ОС ПС590N1 СД при облучении гамма-квантами; символы – экспериментальные данные; линии – установленные соотношения

В результате анализа КО установлено, что для СД происходит отсоединение кристалла от теплоотвода, при этом сам кристалл сохраняет работоспособность. Подобное явление наблюдали ранее [15] при проведении ускоренных испытаний для оценки надежности и долговечности СД. Отсоединение кристалла от теплоотвода свидетельствует о том, что температура приблизилась к предельно допустимому значению, которое определяется температурой плавления омических контактов.

Таким образом, можно утверждать, что наблюдаемая нестабильность СД и появление области аномальных ВАХ на втором этапе обусловлено приближением температуры к предельно допустимому значению.

Увеличение теплового сопротивления для ПС590N1 достаточно хорошо можно видеть при сопоставлении ВАХ (см. рис. 1). Чем раньше выделяется область ВТ, тем более сильный разогрев СД. Кроме того, для ПС590N1 в явном виде проявляется стадия развития КО.

Полученные, используя вышеуказанную методику, индивидуальные коэффициенты пропорциональности позволяют целенаправленно исследовать деградиационные процессы в СД при воздействии различных внешних факторов (электрическое поле, температура, длительная эксплуатация, различные виды ионизирующего излучения и т.д.).

Полученные в результате применения настоящей методики напряжения отсечки исходных СД и их исходные сопротивления представлены в табл. 2. Наблюдаемые различия ОС СД, изготовленных из одного материала (например, IA590N1 и IA587N2), обусловлены не только различием партии приборов, но и в том числе различным технологическим исполнением СД, изготовленным из различных материалов.

Данная методика предназначена для определения электрофизических характеристик СД на основе анализа прямой ветви ВАХ, и дальнейшего их анализа в результате воздействия внешних факторов может быть использована для анализа работы всех известных типов СД.

Таблица 2. Исходные сопротивления и напряжения отсечки СД

Тип СД	U_0 , В	R , Ом
IA590N1	$1.85 \div 1.92$	$1.7 \div 3.5$
IA587N2	$1.90 \div 1.92$	$7.9 \div 11.0$
IA630N1	$1.79 \div 1.82$	$1.4 \div 3.5$
IA624N2	$2.08 \div 2.13$	$5.2 \div 5.4$
IB459	$3.09 \div 3.12$	$2.6 \div 3.2$
IB527	3.09	3.10
IB465	$3.08 \div 3.10$	$2.7 \div 3.7$
ПС590N1	$1.91 \div 1.93$	$4.5 \div 5.1$
ПС590N2	$2.10 \div 2.13$	$3.1 \div 5.4$
ПС630	1.64	$4.6 \div 6.9$
IID567	1.645	$3.8 \div 5.7$
IID693	$1.63 \div 1.70$	$5.3 \div 5.8$

4. Заключение

Установлено, что независимо от используемого полупроводникового материала, от наличия/отсутствия квантовых ям для всех типов исследуемых СД на прямой ветви ВАХ и ВТАХ можно выделить три характерные области рабочих токов:

- область НТ – на прямой ветви ВАХ и ВТАХ наблюдается характерная нелинейная собственная закономерность роста рабочего тока и мощности излучения;
- область R средних токов – прямая ветвь ВАХ описывается омическим сопротивлением p - n перехода, при этом для ВТАХ наблюдается спад с ростом рабочего тока;
- область ВТ – дополнительный спад мощности излучения за счет повышения температуры активного слоя СД.

Сублинейный участок прямой ветви ВАХ прибора с p - n переходом можно экстраполировать линейной зависимостью, наклон которой определяется его омическим сопротивлением.

Диапазон напряжений при протекании рабочего тока определяется высотой потенциального барьера между активной областью и буферными слоями СД. Так, для исследуемых СД при протекании прямого тока напряжение отсечки изменяется в пределах:

$U_0 = (1.63 - 1.70)$ В – для IID567 и IID693 СД, изготовленных на основе GaP;

$U_0 = (1.79 - 1.92)$ В – для IA590N1 и IA630N1 СД на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами;

$U_0 = (1.9 - 2.13)$ В – для IA587N2 и IA624N2 СД поверхностного монтажа на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами;

$U_0 = (1.64 - 2.13)$ В – для IIC590N1, IIC590N2 и IIC630 СД на основе гетероструктур AlGaInP;

$U_0 = (3.09 - 3.13)$ В – для IB459, IB527 и IB465 СД на основе гетероструктур AlGaN.

Разработана методика, предназначенная для определения электрофизических характеристик СД на основе анализа прямой ветви ВАХ? и может быть использована для анализа работы всех известных типов СД, а также для анализа работы других полупроводниковых приборов, работа которых основана на использовании p - n перехода и барьера Шоттки.

Финансирование

Работа выполнена в рамках финансирования НИОКР «Разработка новых имплантационных методов получения диэлектрических промежуточных слоёв в полупроводниковых подложках для систем управления термоядерных установок» № 25 от 9 января 2025 г.

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. *Таперо К.И., Демидась Г.В., Щемеров И.В.* Исследование деградации GAAS/GE солнечных элементов вследствие радиационно-индуцированных эффектов структурных повреждений // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2011. № 3. С. 46–51.
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 // Журнал 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. P. 762–782.
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.
7. *Мелебаев Д., Аннабердиева М.Р., Котыров М., Таулиева А.М.* Оптические свойства фосфида галлия и фотодиоды Шоттки на его основе // Национальная ассоциация ученых, 2021. № 65-2. С. 35–51.
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, Sevastopol, Ukraine, 2014. Pp. 874–875. DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959672
12. *Бурмистров, Е.Р., Авакянц, Л.П., Афанасова, М.М.* Пьезоэлектрическая релаксация двумерного электронного газа в гетероструктурах с квантовыми ямами InGaN/GaN // Известия высших учебных заведений. Физика, 2021. Т. 64. № 5 (762). С. 9–19.
13. *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. Т. 56. № 11–3. С. 116–119.
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 60Co gamma-quanta on reliability of IR-LEDs based upon AlGaAs heterostructures // Physica status solidi (c), 2016. V. 13. № 10–12. Pp. 895–902.
16. *Симонова А.В.* Влияние ионизирующего излучения на деградационные процессы в светодиодах при эксплуатации: диссертация кандидата технических наук. Томск, 2019. 130 с.

Determining method for LEDs electrophysical characteristics

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 March 14, 2025; revised July 25, 2025; accepted July 30, 2025

A method is presented for analyzing the electrophysical characteristics of LEDs (hereinafter referred to as LEDs) made from various semiconductor materials of group AIII BV under the influence of external factors (ionizing radiation, long-term operation, elevated temperature, electric fields, etc.). This technique is intended to determine the ohmic resistance of LEDs, and individual proportionality coefficients, which allow targeted investigation of degradation processes in LEDs. It is shown that characteristic areas of the operating current flow are distinguished on the volt-ampere characteristics (hereinafter referred to as I-V characteristics): the low-current region LT, the LED ohmic resistance region – R region, and the high-current region HT. It is shown that the sublinear section of the direct branch of the I-V characteristic of a device with a p-n junction can be extrapolated by a linear dependence, the slope of which is determined by its ohmic resistance. Physico-mathematical relationships have been determined for the ohmic resistance of LEDs made of any materials. For the studied LEDs based on AlGaInP (with and without multiple quantum wells), AlGaN with multiple quantum wells and single-crystal GaP, the ranges of cutoff voltages are determined when forward current flows. A technique is presented that can be used to analyze the operation of any devices whose operating principle is based on the use of a p-n junction and a Schottky barrier.

Keywords: LEDs, ohmic resistance, current-voltage characteristic, radiation resistance.

References

1. *Tapero K.I., Demidas' G.V., Shchemerov I.V.* Issledovanie degradatsii GAAS/GE solnechnykh elementov vsledstvie radiacionno-inducirovannykh effektov strukturnykh povrezhdenij [Study of GAAS/GE Solar Cell Degradation Due to Radiation-Induced Structural Damage Effects]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnuyu apparaturu*, 2011. No. 3. Pp. 46–51 (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 harakteristiki i kvantovaya effektivnost' ot del'nykh spektral'nykh 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. *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.
7. *Melebaev D., Annaberdieva M.R., Kotyrov M., Tashlieva A.M.* Opticheskie svoystva fosfida galliya i fotodiody Shottki na ego osnove [Optical properties of gallium phosphide and Schottky photodiodes based on it]. *Natsional'naya assotsiatsiya uchenykh*, 2021. No. 65-2. Pp. 35–51 (in Russian).
8. *Ionychev V.K., Shesterkina A.A.* Issledovanie glubokikh centrov v mikroplazmennyykh kanalah 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.* 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 radiacionnogo vozdejstviya 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.* Change in radiating power of the algaInP heterostructures under irradiation by fast neutrons. 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. Sevastopol, Ukraine, 2014. Pp. 874–875. DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959672.
12. *Burmistrov, E.R., Avakyanc, L.P., Afanasova, M.M.* P'ezoelektricheskaya relaksaciya dvumernogo elektronogo gaza v geterostrukturah s kvantovymi yamami InGaN/GaN [Piezoelectric Relaxation of Two-Dimensional Electron Gas in InGaN/GaN Quantum Well Heterostructures]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*, 2021. Vol. 64. No. 5 (762). Pp. 9–19 (in Russian).
13. *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).
14. *Gentsar' P.A.* Radiatsionno-stimulirovannaya relaksatsiya vnutrennikh mekhanicheskikh napryazhenii v gomoehpiktaksial'nykh plenkakh 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 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.
16. *Simonova A.V.* Vliyanie ioniziruyushchego izlucheniya na degradacionnye processy v svetodiodah pri ekspluatatsii. Diss. kand. tekhn. nauk [The influence of ionizing radiation on degradation processes in LEDs during operation Diss. Cand. Tech. Sci.]. Tomsk, 2019. 130 p.