

УДК: 621.383.933:621.3.029.78

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ПРЯМОЙ ВЕТВИ ВАХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ P-N-ПЕРЕХОДА

А. В. Градобоев, А. В. Симонова, К. Н. Орлова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Томск, пр. Ленина 30

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2018 г.

Аннотация. В работе на примере светодиодов представлен комплекс методов определения сопротивления базы р-п-перехода и сопротивления омических контактов путем измерения прямой ветви вольт-амперной характеристики. Изложенные методы позволяют контролировать изменение электрофизических характеристик активных слоев приборов на основе р-п-перехода и изменение сопротивления омических контактов металл-полупроводник в результате действия различных факторов (длительная наработка, различные виды ионизирующего излучения и т.д.). Практическая реализация предлагаемых методов определения сопротивления омических контактов и сопротивления базы достаточно проста и не требует применения дорогостоящего оборудования.

Ключевые слова: р-п-переход, прямая ветвь ВАХ, сопротивление базы, сопротивление омических контактов.

Abstract. On the LEDs example the work presents a set of determining methods the p-n junction base resistance and the ohmic contacts resistance by measuring the direct branch of the current-voltage characteristic. The described methods allow you to control the electrophysical characteristics change of the active layers devices based on the p-n-junction and the change in resistance of metal-semiconductor ohmic contacts as a result of various factors (prolonged operating time, various types of ionizing radiation, etc.). The practical implementation of the proposed methods for determining the ohmic contacts resistance and the resistance of the base is quite simple and does not require the expensive equipment use.

Key words: p-n-junction, direct branch of VI characteristic, base resistance, ohmic contacts resistance.

1. Введение

Различные полупроводниковые приборы на основе р-п-переходов наиболее широко используются в самых разнообразных изделиях электронной техники. По условиям эксплуатации они подвергаются комплексному и комбинированному действию эксплуатационных факторов и различных видов ионизирующего излучения [1-11]. При этом для большинства указанных приборов одной из важнейших приборных характеристик является прямая и/или обратная ветви вольтамперной характеристики (далее ВАХ). К настоящему времени имеется достаточно большое количество работ по исследованию влияния различных факторов (здесь и далее под различными факторами будем понимать факторы длительной эксплуатации и различные виды ионизирующего излучения) на ВАХ данных приборов. При этом чаще всего исследователи ограничиваются тем, что приводят общий вид ВАХ, в то время как подробный анализ изменения формы ВАХ позволяет получить достаточно большое количество дополнительной информации.

Известно, что неотъемлемой частью указанных приборов является омический контакт металл – полупроводник (далее ОК). В настоящее время при анализе приборов с р-п-переходом практически не рассматривают влияние ОК на их радиационную стойкость и надежность. Но с другой стороны известно, что ОК металл – полупроводник для некоторых типов приборов более чувствителен к воздействию различных видов ионизирующего излучения по сравнению с изменением концентрации носителей заряда и их подвижности в их активных слоях [12-14]. Аналогичным образом, экспериментально установлено, что ОК могут быть более чувствительными к воздействию эксплуатационных факторов и именно их деградация может ограничивать надежность полупроводниковых приборов [15-16].

Кроме того, воздействие различных факторов в процессе эксплуатации приборов на основе р-п-переходов может приводить к изменению электрофизических характеристик их активных (рабочих) слоев. Прежде всего, в данном случае следует говорить об изменении концентрации носителей заряда и профиля ее распределения в активном слое, об изменении подвижности основных носителей заряда, а также об изменении времени жизни неосновных носителей заряда. Следует также отметить, что перечисленные выше электрофизические характеристики активных слоев приборов на основе р-п-переходов и определяют их приборные характеристики.

Целью работы является анализ прямой ветви ВАХ приборов на основе р-п-переходов и ее изменения в результате действия различных внешних факторов, а также разработка методики извлечения дополнительной информации об изменении электрофизических характеристик их активных слоев

2. Объекты исследований и используемое оборудование

В качестве объектов исследований выбраны промышленные светодиоды ИК-диапазона длин волн на основе двойных гетероструктур AlGaAs, $\lambda = (820 - 900)$ нм. Гетероструктуры AlGaAs с толщиной активного слоя около 2 мкм были получены методом жидкофазной эпитаксии при использовании монокристаллического n^+ -GaAs в качестве подложки.

СД изготавливались по стандартной сэндвич-технологии с применением методов осаждения и формирования слоев металлизации для создания ОК; методов фотолитографии и химического травления для формирования кристаллов (чипов) и скрайбирования для разделения пластин на отдельные чипы.

Корпус СД изготавливался из оптического компаунда и содержал линзу, для формирования требуемой диаграммы направленности светового потока.

Для каждого СД измеряли прямую ветвь ВАХ с помощью измерительного комплекса, который позволял изменять прямое напряжение СД в пределах от 0 до 5 В при изменении прямого тока в диапазоне (1 – 500) мА с шагом не менее

1 мА, погрешность задания прямого тока от установленного уровня – $\pm 2\%$, погрешность измерения прямого напряжения $\pm 2\%$.

Для повышения достоверности результатов для каждого эксперимента проводилось не менее 10 измерений. Полученные таким образом результаты подвергались стандартной статистической обработке и в дальнейшем использовали полученные средние значения измеряемых величин.

3. Анализ информативности прямой ветви ВАХ СД

Рассмотрим, каким образом можно получить информацию о процессах деградации в активных слоях приборов на основе р-п-перехода при воздействии различных внешних факторов путем анализа прямой ветви ВАХ СД.

Из представленного выше анализа известных литературных данных можно сделать вывод о том, что чаще всего деградация приборных характеристик различных СД (подобно другим видам приборов на основе р-п-перехода) является следствием деградации сопротивления омических контактов металл-полупроводник и деградации электрофизических и/или светотехнических характеристик их активного элемента (кристалла).

Таким образом, к основным характеристикам СД, изменение которых следует контролировать при исследовании воздействия различных внешних факторов на прямую ветвь ВАХ, следует отнести контроль сопротивления омических контактов и омического сопротивления базы р-п-перехода.

Рассмотрим, каким образом можно определить сопротивление омических контактов из анализа изменений ВАХ СД.

3.1 Определение суммарного омического сопротивления базы СД и сопротивления ОК

Прямая ветвь ВАХ приборов на основе р-п-перехода позволяет определить сопротивление базы и сопротивление ОК и, соответственно, их изменение в результате воздействия различных факторов.

На рис.1 приведена типичная ВАХ исследуемых СД. Прямую ветвь ВАХ р-п-перехода СД в этом случае можно описать известным соотношением [17,18].

$$I_{paб} = I_s \left\{ \exp \left[\frac{q}{\eta k T} (U_{paб} - I_{paб} \cdot R_{\Sigma}) \right] - 1 \right\} \quad (1)$$

где $I_{paб}$ – рабочий ток диода в прямом направлении; $U_{paб}$ – напряжение смещения прямой полярности; I_s – ток насыщения, величина которого зависит от высоты барьера, температуры, площади контакта и некоторых других величин; η – коэффициент неидеальности ВАХ; R_{Σ} – суммарное омическое сопротивление. Остальные обозначения общепринятые.

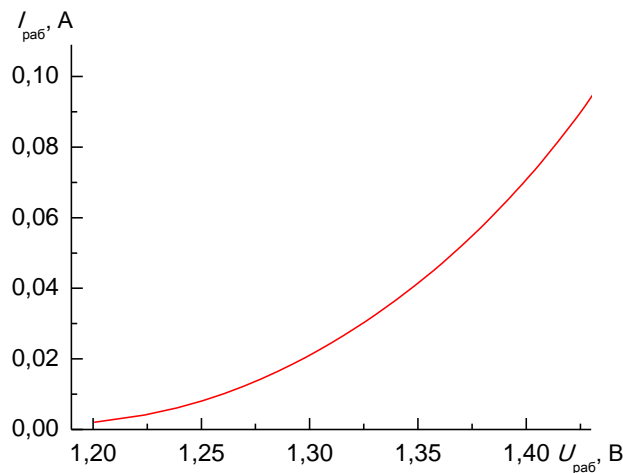


Рис. 1 — Типичная прямая ветвь ВАХ исследуемого СД

В свою очередь суммарное омическое сопротивление R_{Σ} можно представить в следующем виде

$$R_{\Sigma} = R_B + R_C, \quad (2)$$

где R_B – сопротивление базы р-п-перехода, величина которого определяется удельным сопротивлением активного слоя и его геометрическими размерами; R_C – сопротивление ОК.

Тогда, на основании (1), для дифференциального сопротивления р-п-перехода $R_{диф}$ получаем

$$R_{диф} = \frac{1}{\frac{dI_{paб}}{dU_{paб}}} = \frac{\eta k T}{q(I + I_s)} + R_{\Sigma} \quad (3)$$

Здесь I_s – ток насыщения.

Зависимость дифференциального сопротивления р-п-перехода от рабочего тока может быть определена по результатам измерения прямой ветви ВАХ. Если экстраполировать экспериментально измеренную зависимость дифференциального сопротивления от прямого тока в точку $1/I_{\text{раб}} = 0$, тогда можно определить величину сопротивления R_{Σ} .

На рис.2 представлены типичный результат определения R_{Σ} для исследуемых исходных СД-1 (ВАХ для данного СД приведена на рис1). Рассматриваемая зависимость получена в результате усреднения не менее 10 измерений для одного и того же прибора. Подобную процедуру измерений будем использовать и для всех последующих случаев. На рисунке также представлено среднее значение суммарного омического сопротивления R_{Σ} . Как видно из представленных результатов, описанная выше методика позволяет определять величину суммарного омического сопротивления R_{Σ} по результатам измерения прямой ветви ВАХ приборов на основе р-п-перехода.

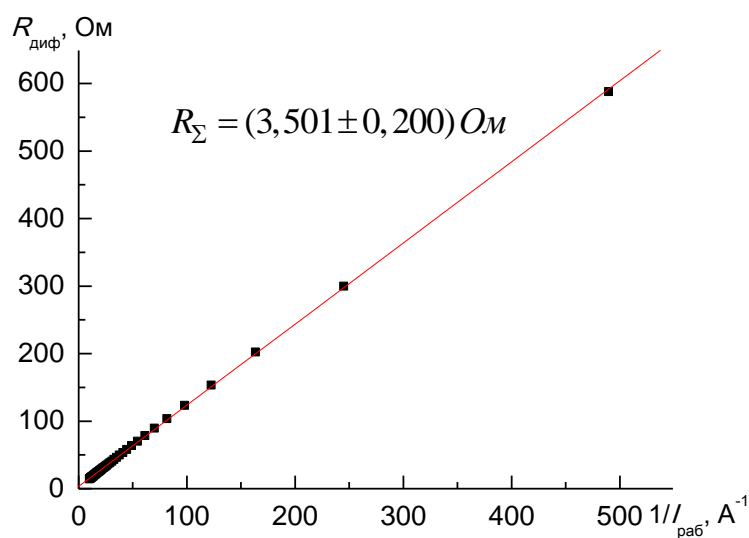


Рис.2 — Типичная зависимость $R_{\text{диф}}$ от величины рабочего тока для СД-1

Следует также отметить, что наклон зависимости, представленной на рис. 2, определяет величину коэффициента неидеальности η , что вытекает из соотношения (3).

Таким образом, представленные выше результаты наглядно демонстрируют возможность определения R_{Σ} путем анализа прямой ветви ВАХ приборов на основе р-п-перехода с достаточно высокой точностью. Тогда на основании анализа изменения прямой ветви ВАХ можно контролировать изменение R_{Σ} в результате действия различных факторов включая технологические факторы, факторы длительной эксплуатации и действие различных видов ионизирующего излучения [19,20].

Далее необходимо решить вопрос о возможности разделения сопротивления базы р-п-перехода и сопротивления ОК.

3.2 Определение сопротивления омических контактов СД

Рассмотрим, каким образом можно оценить вклад сопротивления ОК в R_{Σ} ? Рост сопротивления ОК СД должен приводить к соответствующему изменению формы прямой ветви ВАХ. В частности с ростом сопротивления ОК должен появиться соответствующий сдвиг ВАХ по оси напряжений вправо за счет появления дополнительного падения рабочего напряжения на ОК. Тогда изменение сопротивления ОК СД можно моделировать подключением набора последовательных известных сопротивлений R_i .

На рис.3 представлены ВАХ СД, которые были измерены для случая последовательного подключения различных известных омических сопротивлений R_i . Т.е., мы провели физическое моделирование изменения сопротивления ОК путем использования набора прецизионных резисторов R_i , данные о которых приведены ниже в таблице 1 (строка 1).

Сопротивление резисторов, используемых для физического моделирования изменения сопротивления омических контактов, измеряли с точностью до четвертого знака, поэтому все результаты определения омических сопротивлений также приводятся с точностью до четвертого знака. Из рис. 3 видно, что действительно с ростом сопротивления ОК наблюдается характерный сдвиг ВАХ в область более высоких прямых напряжений. Тогда, изменение R_{Σ} в зависимости от величины R_C можно определить из ВАХ несколькими независимыми способами.

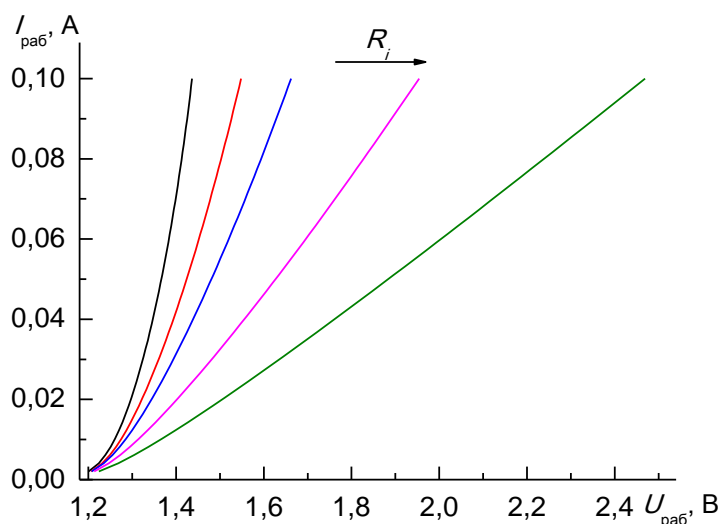


Рис.3 — Изменение ВАХ СД-1 с ростом сопротивления ОК

Таблица 1. Результаты определения R_{Σ} различными способами

№	Обозначение	R0	R1	R2	R3	R4	Способ определения
1	R_i , Ом	0	1,092	2,331	5,278	10,34	-
2	R_{Σ} , Ом	3,501	4,580	5,730	8,659	13,79	по $R_{диф}$
3	R_{Σ} , Ом	3,501	4,593	5,832	8,779	13,84	по формуле (4)
4	$\Delta R_C = R_i$, Ом	-	1,083	2,229	5,135	10,30	вычитание ВАХ
5	R_C , Ом	1,255	2,347	3,486	6,393	11,58	из ВАХ, высокие $I_{раб}$
6	$\Delta R_C = R_i$, Ом	0	1,092	2,231	5,138	10,33	(строка 5) – 1,255 Ом
7	R_B , Ом	2,246	2,233	2,244	2,266	2,210	(строка 2) – (строка 5)
8	R_B , Ом	2,246	2,246	2,346	2,386	2,260	(строка 3) – (строка 5)

Прежде всего, изменение R_{Σ} с ростом сопротивления ОК можно определить, используя описанную выше процедуру. Полученные, таким образом, результаты приведены в таблице 1 (строка 2).

Из представленных в таблице 1 результатов видно, что определяемое таким образом суммарное омическое сопротивление $R_{\Sigma i}$ может быть описано

следующим образом (таблица 1, строка 2 – измерения, строка 3 расчет по формуле (4))

$$R_{\Sigma i} = R_{\Sigma 0} + R_i \quad (4)$$

Тогда величину изменения сопротивления ОК в результате моделирования ΔR_{Ci} можно определить следующим образом

$$\Delta R_{Ci} = R_{\Sigma i} - R_{\Sigma 0} \quad (5)$$

В данном случае i будет характеризовать уровень воздействующего фактора.

При этом, из представленных результатов следует, что наблюдаемое в случае физического моделирования изменение сопротивления ОК соответствующее изменению R_{Σ} будет обусловлено только изменением сопротивления ОК R_{Ci} (5).

Поскольку подключение последовательного известного омического сопротивления приводит к сдвигу ВАХ в область более высоких напряжений, то изменение сопротивления ОК можно определить путем вычитаний из каждой последующей ВАХ исходной ВАХ.

На рис.4 показана зависимость приращения рабочего напряжения ΔU от величины рабочего тока при различных значениях подключаемого известного омического сопротивления R_i . Величина ΔU определялась вычитанием из соответствующих ВАХ исходной ВАХ (рис.3).

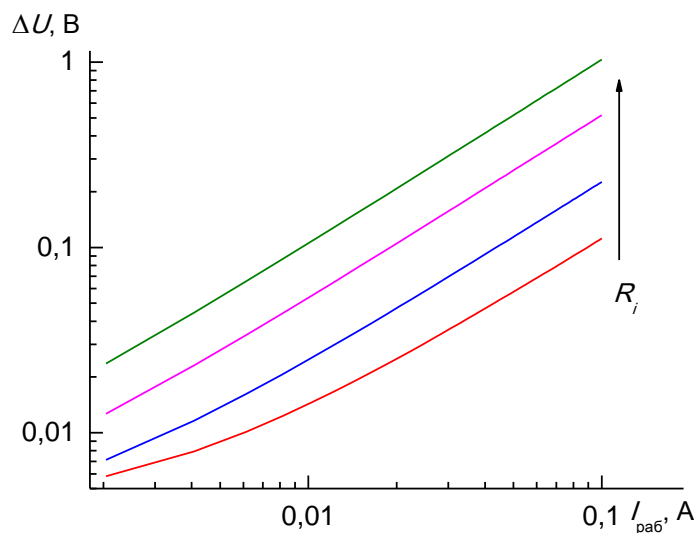


Рис.4 — Зависимость приращения напряжения смещения от величины рабочего тока СД для различных значений R_i

Видно, что в области достаточно высоких токов (более 0,01 А в рассматриваемом случае) наблюдается линейная зависимость, наклон которой определяется величиной подключаемого последовательно известного омического сопротивления R_i (таблица 1, строка 4).

Полученные таким образом результаты позволяют сделать однозначный вывод о том, наклон прямой ветви ВАХ р-n-перехода в области высоких токов определяется только сопротивлением ОК, а сопротивление базы в этом случае пренебрежимо мало. Тогда получаем, что омическое сопротивление базы и ее изменение в результате действия различных факторов необходимо контролировать в области малых токов.

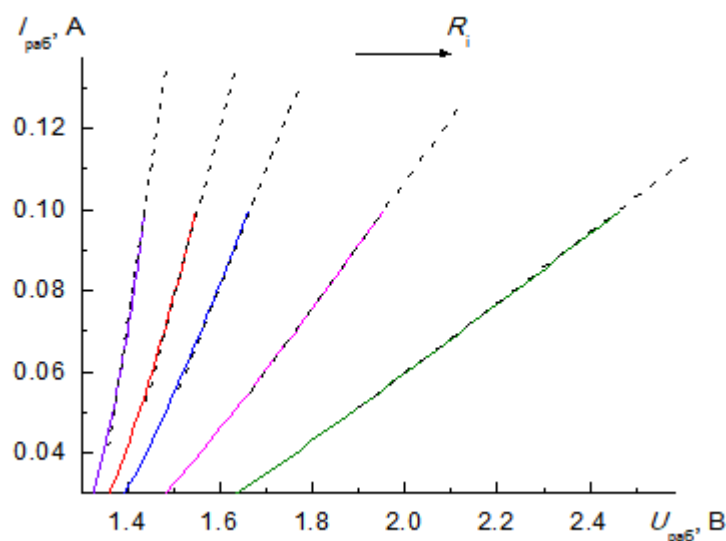


Рис.5 — Определение сопротивления ОК по прямой ветви ВАХ в области высоких токов: сплошные линии – ВАХ в области высоких токов; пунктирные линии – линейная экстраполяция, наклон которой определяется R_C

Рассмотрим результаты определения сопротивления ОК из наклона ВАХ в области высоких токов, которые представлены на рис.5 для различных значений R_i . Из представленных результатов видно, что действительно ВАХ в области высоких токов можно описать линейной зависимостью, наклон которой определяет величину сопротивления ОК. Полученные таким образом результаты представлены в таблице 1 (строка 5).

Таким образом, на основании представленных результатов можно сделать вывод о том, что использование линейной экстраполяции ВАХ в области больших токов позволяет определять величину сопротивления ОК в приборах на основе р-п-перехода. Следует отметить, что для снижения погрешности определения R_C можно использовать измерение ВАХ с подключенным известным омическим сопротивлением (см. рис.3).

Зная величину сопротивления ОК можно определить омическое сопротивление базы СД R_B , используя формулу (2). В таблице 1 (строка 7 и строка 8) представлены результаты определения R_B , которые отличаются в пределах погрешности измерения.

Таким образом, изложенные выше результаты позволяют предложить достаточно простую комплексную методику определения сопротивления ОК и сопротивления базы для приборов на основе р-п-перехода. Практическое применение предложенной методики позволяет исследовать влияние различных факторов на работу приборов на основе р-п-перехода.

4. Заключение

Суммируем основные результаты и выводы, полученные в данной работе.

1. По результатам измерения прямой ветви ВАХ приборов на основе р-п-перехода можно построить зависимость дифференциального сопротивления от обратного тока $1/I_{\text{раб}}$, которая позволяет определить суммарное омическое сопротивление, величина которого определяется омическим сопротивлением базы р-п-перехода и сопротивлением омических контактов.
2. Сублинейный участок прямой ветви ВАХ прибора с р-п-переходом в области больших токов можно экстраполировать линейной зависимостью, наклон которой определяется сопротивлением омических контактов.
3. Используя значение суммарного омического сопротивления прибора на основе р-п-перехода и величину сопротивления омических контактов можно определить сопротивление базы р-п-перехода.
4. Если сублинейный участок на прямой ветви ВАХ прибора с р-п-переходом мал и линейная экстраполяция затруднена, то следует измерить

ВАХ исследуемого прибора с подключенным известным последовательным сопротивлением, экстраполировать сублинейный участок линейной зависимостью и определить суммарное омическое сопротивление. Затем определить сопротивление омических контактов исходного прибора как разность измеренного суммарного омического сопротивления за вычетом известного включенного последовательно омического сопротивления.

5. Изложенная выше методика определения сопротивления базы р-п-перехода и сопротивления омических контактов может быть использована для любых приборов на основе р-п-перехода, а также для приборов с барьером Шоттки, при исследовании влияния конструктивных и технологических факторов, факторов длительной эксплуатации, действия различных видов ионизирующего излучения на изменение сопротивления базы и сопротивления омических контактов.

6. Практическая реализация предлагаемых методов определения сопротивления омических контактов и сопротивления базы достаточно проста и не требует применения дорогостоящего оборудования.

Литература

1. Leung K. K. et al. Physical mechanisms for hot-electron degradation in GaN light-emitting diodes // Journal of Applied Physics. 2010. Т. 107. №. 7. С. 073103.
2. Басалкевич Т. М., Тальнишних Н. А., Шмидт Н. М. Особенности развития деградиационного процесса в мощных синих светодиодах InGaN/GaN // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2012. №. 3 (153).
3. Бобученко Д. С. и др. Спектральное распределение спонтанной электролюминесценции зеленых светоизлучающих диодов // Приборы и методы измерений. 2010. №. 1 (1).

4. Шукайло В. П. и др. Исследование спектров электролюминесценции светодиодов на основе GaN-структур при нейтронном облучении // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Радиофизика. 2012, №. 6(1), С. 51-55
5. R.J. Chaffin Microwave semiconductor devices: Fundamentals and Radiation Effects. New York, Willey, 1973, 387p.
6. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / Под ред. В.М.Кулакова, Е.А.Ладыгина. М.: Сов. радио, 1980, 224 с.
7. Эффекты космической радиации в микроэлектронике. Малый тематический выпуск под ред. Ш.Э. Кернс и К.Ф. Галлоуэй // ТИИЭР, 1988, т. 76, №11, С.23-159.
8. Васев Е.Н., Демкин Н.А. Изменение свойств излучающих гетероструктур под действием комбинированного облучения нейтронами и гамма-квантами // Электронная техника. Сер.2. Полупроводн. приборы, 1989, Вып.5, С.109-111.
9. Chang J.Y., Badawi M.H., DeCicco A. Neutron/gamma damage mechanisms and synergistic effects in GaAs MESFETs // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1989, Vol. NS-36, № 6, P.2068-2075.
10. Градобоев А.В., Суржиков А.П. Радиационная стойкость СВЧ приборов на основе арсенида галлия. Томск, Изд. ТПУ, 2005. 277 с.
11. 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.
12. Градобоев А.В. Деградация омического контакта металл-арсенид галлия при облучении быстрыми нейтронами // Перспективные материалы. 2001, №5. С.27-30.

13. Г. Д. Кузнецов, В. П. Сушков, А. Р. Кушков, И. Г. Ермошин, Б. А. Билалов. Омические контакты к GaN // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. 2009. № 3. С. 4-13.
14. Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Конакова Р.В., Миленин В.В., Свешников Ю.Н., Шеремет В.Н. Радиационные повреждения контактных структур с диффузионными барьерами, подвергнутых гамма-облучению ^{60}Co . Физика и техника полупроводников, 2010, Том 44, № 4, с. 467-475.
15. Черных М.И., Фиронов В.А., Цоцорин А.Н. и др. Оценка надежности различных типов многослойной металлизации при воздействии высоких температур // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 2014. Режим доступа: <http://mwelectromcs.ru/2014/Poster/2/P02>.
16. Gradoboev A.V., Orlova K.N., Simonova A.V. The fast neutron irradiation influence on the AlGaAs IR-LEDs reliability // Microelectronics Reliability. 2016, Vol. 65, p. 55-59.
17. Стриха В.И. Теоретические основы работы контакта металл – полупроводник. Киев, Наукова думка, 1974, 264 с.
18. Родерик Э. Х. Контакты металл-полупроводник. Пер. с англ. Москва, Радио и связь, 1982.
19. Brudnyi V. et al. Electron Irradiation Degradation of AlGaInP/GaAs Light-Emitting Diodes // Physica Status Solidi (a). 2018. Vol. 215, №. 8. С. 1700445.
20. Брудный В. Н. и др. Влияние жесткой радиации на электронные, оптические и рекомбинационные свойства соединений (Al, Ga, In)-P,(Al, Ga)-As и их твердых растворов. // Известия ВУЗов. Физика. 2013. Том 56, № 8, С. 36-39.

Для цитирования:

А. В. Градобоев, А. В. Симонова, К. Н. Орлова. Информативность прямой ветви ВАХ приборов на основе р-п-перехода. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/8/text.pdf>
 DOI 10.30898/1684-1719.2019.1.8