

ДИАГНОСТИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО ПАРАМЕТРАМ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА

© 2024 г. М.И. Горлов^{1,*}, В.А. Сергеев^{2,3,**}

¹Воронежский государственный технический университет, Россия 394006 Воронеж,
ул. 20-летия Октября, 84

²УФИРЕ им. В.А. Котельникова РАН, Россия 432073 Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2

³Ульяновский государственный технический университет,

Россия 432029 Ульяновск, ул. Серверный венец, 32

E-mail: *m-gorlov@inbox.ru; **sva@ulstu.ru

Поступила в редакцию 01.12.2023; после доработки 28.05.2024

Принята к публикации 31.05.2024

Данная статья является продолжением и дополнением статьи с таким же названием, опубликованной в журнале «Дефектоскопия» № 1 за 2022 год, в которой приведены шесть способов оценки качества и надежности полупроводниковых изделий (ППИ) с использованием параметров низкочастотного (НЧ) шума. В настоящей статье представлено обобщение ранее полученных авторами результатов и описывается еще четыре способа диагностики и оценки надежности ППИ по изменению параметров НЧ-шума при дополнительных внешних воздействиях, таких как электростатический разряд и (или) термический отжиг. Показано, что дополнительные воздействия позволяют повысить достоверность оценки надежности ППИ.

Ключевые слова: полупроводниковые изделия, транзисторы, качество, надежность, низкочастотный шум, диагностика, прогнозирование.

TESTING SEMICONDUCTOR PRODUCTS USING LOW-FREQUENCY NOISE PARAMETERS

© 2024 M.I. Gorlov^{1,*}, V.A. Sergeev^{2,3,**}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh 394006 Russia

²Ulyanovsk Branch, Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences,
Ulyanovsk 432073 Russia

³Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk 432029 Russia

E-mail: *m-gorlov@inbox.ru; **sva@ulstu.ru

This article is a continuation and addition of the article with the same title published in the journal «Defectoscopy» No. 1 for 2022, which provides six ways to assess the quality and reliability of semiconductor products (SCP) using low-frequency (LF) noise parameters. This article presents a generalization of the results previously obtained by the authors and describes four more methods for diagnosing and evaluating the reliability of SCP by changing the parameters of low-frequency noise under additional external influences such as electrostatic discharge and (or) thermal annealing. It is shown that additional impacts make it possible to increase the reliability of the assessment of the reliability of the SCP.

Keywords: semiconductor products, transistors, quality, reliability, low-frequency noise, diagnostics, forecasting.

DOI: 10.31857/S0130308224060042

ВВЕДЕНИЕ

Считается общепризнанным, что уровень так называемого низкочастотного шума (НЧ-шума) полупроводниковых изделий (ППИ) определяется интенсивностью флуктуаций плотности носителей заряда в различных областях структуры ППИ, вызывающих флуктуации проводимости. Интенсивность этих флуктуаций в свою очередь определяется плотностью различного рода дефектов кристаллической решетки полупроводника, являющегося основой структуры ППИ, и неравновесными процессами в этой структуре при токопрохождении [1, 2]. Указанные процессы протекают как в объеме, так и на поверхности структуры ППИ и могут быть вызваны неравновесной генерацией-рекомбинацией носителей заряда, флуктуацией высоты потенциальных барьеров; туннелированием носителей через эти барьеры и т.п.

Универсальной и широко используемой для описания НЧ-шума ППИ характеристикой, определяющей его вид и свойства, является спектральная плотность мощности (СПМ) $S(f, I)$. Зависимость СПМ НЧ-шума ППИ от частоты f и силы тока I обычно аппроксимируется выражением [1, 2]:

$$S(f, I) = AI^\alpha/f^\gamma,$$

где значения коэффициента A , определяющего уровень НЧ-шума, показателя степени α и показателя формы спектра γ определяются свойствами исследуемого ППИ, при этом показатель α степени токовой зависимости НЧШ при токах, не приводящих к локальным перегревам, обычно близок к двум ($\alpha \approx 2$), а показатель γ близок к единице ($\gamma \approx 1$).

Существенное превышение уровня НЧ-шума некоторого среднего по выборке ППИ уровня свидетельствует о повышенной дефектности и потенциальной ненадежности изделия, а значение уровня НЧ-шума целесообразно использовать для отбраковки потенциально ненадежных изделий [3—6]. Однако достоверность отбраковки дефектных ППИ по уровню шума является невысокой (~50 %). Для повышения достоверности прогнозирования надежности эффективным является использование различных внешних воздействий (электростатический разряд, облучение, например, рентгеновским или гамма-излучением, термоциклирование и т.п.) на ППИ [7—10]. Такие воздействия приводят к активации существующих и генерации новых дефектов в структуре ППИ, что в свою очередь будет приводить к изменению параметров НЧ-шума [11].

Как уже отмечалось, зависимость СПМ НЧ-шума от режима работы ППИ определяется тремя параметрами, зависящими от внутреннего состояния структуры изделия: уровень шума A (например, квадрат среднеквадратичного значения шумового напряжения $\bar{U}_{ш}^2$, измеренного в определенной полосе частот); показатель формы спектра γ , характеризующий степень изменения СПМ НЧ-шума от частоты, и коэффициент α токовой зависимости СПМ НЧ-шума. При использовании внешних воздействий на ППИ для отбраковки потенциально ненадежных изделий более информативными могут быть не абсолютные значения параметров НЧ-шума, а их изменение после воздействия [1].

Цель данной статьи — показать возможности разработанных, апробированных на практике и получивших дальнейшее развитие в последние годы в Воронежском государственном техническом университете и УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН способов диагностики и разделения ППИ по надежности с использованием параметров НЧ-шума и дополнительных воздействий.

ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ППИ ПО ПАРАМЕТРАМ НЧ-ШУМА ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Первый способ — способ определения потенциально ненадежного ППИ [12] путем измерения величины относительного изменения интенсивности шума до и после подачи электростатического разряда (ЭСР), по которой судят о потенциальной нестабильности ППИ. Для этого на приборы воздействуют ЭСР напряжением, на 20–30 % превышающим допустимый по техническим условиям (ТУ) потенциал, после чего проводят термический отжиг при температуре 100—125 °С в течение 2—4 ч, а величину относительного изменения интенсивности шумов рассчитывают по формуле:

$$F = (\bar{U}_{ш\ ЭСР}^2 - \bar{U}_{ш\ нач}^2) / (\bar{U}_{ш\ ЭСР}^2 - \bar{U}_{ш\ отж}^2),$$

где $\bar{U}_{ш\ нач}^2$, $\bar{U}_{ш\ ЭСР}^2$, $\bar{U}_{ш\ отж}^2$ — значения уровня шума до, после воздействия ЭСР и после отжига соответственно.

В зависимости от критерия F , установленного для каждого типа ППИ, определяют надежность изделия. Предложенный способ был опробован на транзисторах типа КТ133А. У 10 штук транзисторов типа КТ133А, отобранных методом случайной выборки, измерили среднеквадратичное напряжение шума на частоте 1 кГц в полосе частот 200 Гц. После этого на каждый транзистор воздействовали ЭСР амплитудой 1500 В и снова измеряли уровень шума. Затем провели отжиг при 100 °С в течение двух часов и вновь измерили шум. Результаты измерений приведены в табл. 1.

При установлении критерия отбраковки $F > 1,125$ к потенциально ненадежным будут отнесены транзисторы №№ 10, 1, 8. Установив второй, более жесткий критерий отбора: $F > 1$, к приборам повышенной надежности будут отнесены транзисторы № 2, 6, 7, а транзисторы № 3, 9, 4, 5 по надежности соответствуют ТУ на данный тип транзисторов.

Для проверки достоверности описанного способа разделения транзисторов на потенциально ненадежные и приборы с повышенной надежностью на каждый транзистор воздействовали ЭСР, начиная с напряжения 1500 В с повышением напряжения каждого следующего импульса на 100 В до появления катастрофического отказа. Результаты испытаний транзисторов приведены в табл. 2.

Как видно из таблицы, с повышением надежности транзистора увеличивается напряжение ЭСР, приводящее к катастрофическому отказу транзистора.

Таблица 1

Результаты измерения уровня шума транзисторов КТ133А до и после воздействий

№ транзистора	Значение уровня шума, мВ ²			F
	$\bar{U}_{ш\text{ нач}}^2$	$\bar{U}_{ш\text{ ЭСР}}^2$	$\bar{U}_{ш\text{ отж}}^2$	
1	55	62	57	1,4
2	57	61	57	1,0
3	59	68	60	1,125
4	69	77	70	1,14
5	67	78	68	1,1
6	59	67	59	1,0
7	60	68	60	1,0
8	50	55	51	1,25
9	62	69	63	1,18
10	65	73	88	1,6

Таблица 2

Оценка надежности транзисторов КТ133А по уровню ЭСР, приводящему к катастрофическому отказу

Оценка надежности транзисторов	№ транзистора	Напряжение ЭСР, приводящее к катастрофическому отказу, В
Потенциально ненадежен	10	1900
Потенциально ненадежен	1	2100
Потенциально ненадежен	8	2400
Надежность соответствует ТУ	3	2800
Надежность соответствует ТУ	9	3200
Надежность соответствует ТУ	4	3300
Надежность соответствует ТУ	5	3500
Повышенная надежность	2	4200
Повышенная надежность	6	4000
Повышенная надежность	7	3900

Таблица 3

Интенсивность шумов различных переходов транзисторов

№ п/п	Уровень НЧ-шума $p-n$ -переходов, $\bar{U}_{ш}^2$, мВ ²		Значение разности уровня шума $\Delta \bar{U}_{ш}^2$, мВ ²
	Э—Б	К—Б	
1	67	62	5
2	69	63	6
3	73	64	9
4	65	63	3
5	68	65	3
6	69	66	3
7	72	66	6
8	70	67	3
9	64	60	4
10	66	61	5
11	67	64	3
12	71	68	3
13	73	69	4
14	70	66	4
15	68	67	1

По второму способу [13] определение потенциально ненадежных транзисторов проводят по разности значений уровня НЧ-шума переходов Э—Б и К—Б. Способ апробирован на 15 транзисторах КТ3107А, отобранных методом случайной выборки: значения уровней НЧ-шумов переходов Э—Б и К—Б и их разности приведены в табл. 3, минимальное, среднее и максимальное значение их разности приведены в табл. 4.

Таблица 4

Обработанные данные уровня НЧ-шума для p — n -переходов транзисторов КТ3107А

p — n -переход	Значение $\bar{U}_{ш}^2$, мВ ²		
	Минимальное	Среднее	Максимальное
Э—Б	65	68,8	73
К—Б	60	64,7	69
Значение разности	5	4,1	4

Из табл. 4 определяем, что у надежных транзисторов разность уровня НЧ-шума $\Delta_{шп} = \bar{U}_{ш\text{ЭБ}}^2 - \bar{U}_{ш\text{КБ}}^2$ должно быть не более 5, поэтому транзисторы № 2, 3, 7 будут потенциально ненадежными.

Для подтверждения способа проведены испытания транзисторов на долговечность в течение 2000 ч при нормальной температуре, напряжении коллектор—база $U_{КБ} = 30$ В и коллекторном токе $I_{К} = 10$ мА. Получены следующие результаты: коэффициент усиления по току всех испытываемых транзисторов был в нормах ТУ. Обратный ток $I_{КБ0}$ перехода коллектор—база после испытаний у транзисторов №№ 2, 3, 7 увеличился в 10—15 раз, выйдя за нормы ТУ; у остальных транзисторов $I_{КБ0}$ увеличился в 3—8 раз, оставаясь в нормах ТУ. Таким образом, транзисторы №№ 2, 3, 7 оказались ненадежными.

Третий способ разделения ППИ по надежности [14] состоит в следующем. У каждого изделия измеряют уровень НЧ-шума в диапазоне токов до 1 мА, строят ампер-шумовые характеристики для максимальных и минимальных значений $\bar{U}_{ш}^2$, определяют значение тока, при котором разброс ампер-шумовых характеристик наибольший, находят среднее значение $\bar{U}_{ш}^2$ для этих значений тока, и по величине отклонения $\bar{U}_{ш}^2$ каждого изделия от среднего значения при данном токе проводят их разделение по надежности.

Предлагаемый способ разбраковки был опробован на транзисторах типа КТ3102. Из партии транзисторов объемом более 500 штук, полностью соответствующих ТУ, было методом случайной выборки отобрано 20 транзисторов, на которых измерено значение уровня НЧ-шума $\bar{U}_{ш}^2$ при эмиттерных токах 0,05; 0,1; 0,5; 1 мА. Наибольшее значение $\bar{U}_{ш}^2$ наблюдалась у транзистора № 9, наименьшее у транзистора № 4. Были построены ампер-шумовые характеристики для транзисторов № 9 и № 4 (рис. 1). Видно, что наибольшая разность уровня шума (Δ) у транзисторов наблюдается при токе 0,5 мА:

$$\Delta_{шт} = \bar{U}_{ш,9}^2 - \bar{U}_{ш,4}^2 = 6 \text{ мВ}^2.$$

Для этого значения тока среднее значение уровня НЧ-шума на выборке из 20 транзисторов равно 12,7 мВ². Соответственно, транзисторы, у которых $\bar{U}_{ш}^2 \geq 12,7 \text{ мВ}^2$, относят к группе менее надежных транзисторов, а транзисторы со значением $\bar{U}_{ш}^2$ менее 12,7 мВ² — к группе более надежных транзисторов.

Четвертый способ разделения ППИ по надежности [15] состоит в следующем: случайным образом из партии ППИ формируется выборка изделий, измеряется уровень шума $\bar{U}_{ш}^2$ на двух частотах 1000 и 200 Гц при трех разных температурах (0°C, нормальной и 100°C), вычисляют показатель γ формы спектра шума для каждой температуры по формуле:

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{\bar{U}_{шf_1}^2}{\bar{U}_{шf_2}^2}\right)}{\ln(f_2/f_1)},$$

где $\bar{U}_{шf_1}^2$, $\bar{U}_{шf_2}^2$ — квадрат эффективного напряжения шума соответственно на частоте f_1 и f_2 для каждой температуры. Для каждого изделия находят среднее значение $\gamma_{ср}$ по трем температурам и по величине среднего значения $\gamma_{ср}$ партию изделий разделяют на надежные и потенциально ненадежные.

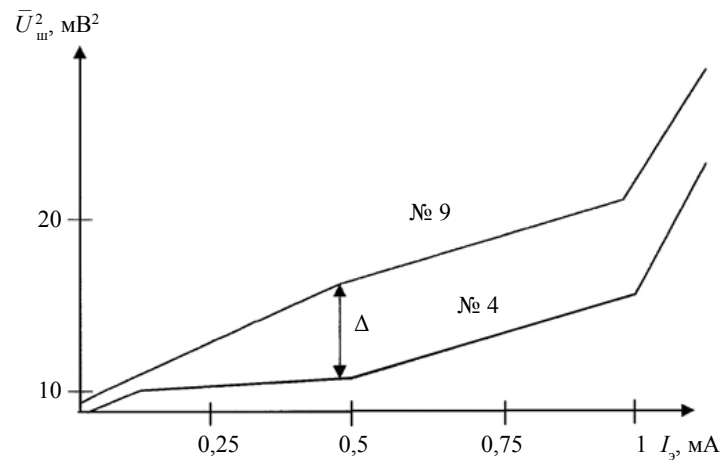


Рис. 1. Ампер-шумовые характеристики для транзисторов № 9, № 4.

Способ был опробован на 10 интегральных схемах (ИС) типа КР537Р413, у которых значение $\bar{U}_{ш}^2$ измерялось методом прямого измерения по выводам «питание — общая точка» на частотах $f_1 = 200$ Гц и $f_2 = 1000$ Гц; ширина полосы частот при измерении $\Delta f_1 = 200$ Гц, время усреднения $t = 2$ с. В табл. 5 приведены измеренные значения $\bar{U}_{ш}^2$ при разных температурах, а в табл. 6 — вычисленные для каждого изделия значения параметра γ и его среднее значение по трем температурам.

Таблица 5

Значения уровня НЧ-шума ИС при разных температурах, на двух частотах $\bar{U}_{ш}^2$, мВ²

№ ИС	0 °С		20 °С		100 °С	
	200 Гц	1000 Гц	200 Гц	1000 Гц	200 Гц	1000 Гц
1	644,7	79,6	439,9	68	853,7	97,9
2	836,3	96,8	553,8	79	1334,2	123,2
3	245,2	44,5	203,3	42	310,6	50,4
4	568,9	74,9	394,5	64	783,7	92,2
5	1322,7	124,2	786	97	1974,6	163
6	615,6	78,4	419,7	67	875	96,8
7	259,2	45,6	201,6	43	310,7	81,6
8	1294	125,4	833,4	98	2062,8	184,6
9	417,3	62,4	303,5	56	534,8	73,9
10	832,6	91,9	534,3	75	1209	117

Таблица 6

Значения показателя γ формы спектра НЧ-шума ИС при разных температурах

№ ИС	0 °С	25 °С	100 °С	$\gamma_{ср}$
1	1,3	1,16	1,35	1,27
2	1,34	1,21	1,48	1,34
3	1,06	0,96	1,13	1,06
4	1,26	1,13	1,33	1,24
5	1,47	1,3	1,55	1,44
6	1,28	1,14	1,37	1,26
7	1,08	0,96	1,12	1,05
8	1,45	1,33	1,57	1,45
9	1,18	1,05	1,23	1,15
10	1,37	1,22	1,45	1,35

Приняв в качестве критерия для надежных ИС $\gamma \leq 1,4$, то ИС № 5, 8 будут потенциально ненадежными (см. табл. 6). Можно также выделить группу ИС повышенной надежности, выбрав более жесткий критерий $\gamma \leq 1,1$: это будут ИС № 3, 7. При проведении испытаний ИС (500 ч, 100°C) образцы № 5, 8 имели параметрические отказы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены различные способы диагностики ППИ и разделения их по надежности по изменению различных параметров НЧ-шума после различного вида физических воздействий на ППИ.

На достаточно представительных выборках ППИ различных классов и типов путем статистических оценок [16] показано, что диагностические методы разделения ППИ по надежности с использованием характеристик НЧ-шумов в комбинации с внешними воздействиями имеют достоверность, близкую к достоверности результатов испытаний на надежность. При этом предлагаемые способы существенно менее трудоемки и затратны, чем традиционные испытания на надежность, и могут быть рекомендованы для применения на практике.

Однако при применении на практике предлагаемых способов диагностики и разделения по надежности для новых классов и типов ППИ необходимо проведение статистически репрезентативных исследований для правильного определения объема выборки и критерия годности (отбраковки) ППИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горлов М.И., Сергеев В.А. Диагностика полупроводниковых изделий по параметрам низкочастотного изделия // Дефектоскопия. 2022. № 1. С. 13—25.
2. Жигальский Г.П. Неразрушающий контроль качества и предсказание надежности интегральных микросхем по электрическим шумам и параметрам надежности // Радиотехника и электроника. 2005. № 5. С. 1—35.
3. Claeys C., Simoen E., Agopian P.G.D., Martino J.A., Aoulaiche M., Cretus B., Fang W., Rooyackers R., Vandooren A., Veloso A., Jurczak M., Collaert N., Thean A. The Smaller the Noisier? Low Frequency Noise Diagnostics of Advanced Semiconductor Devices / August Conference: 2015 30-th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro). DOI: 10.1109/SBMicro.2015.7298104
4. Романцов В.П., Долганов М.В. Прогнозирование надежности интегральных микросхем по параметрам низкочастотных шумов. Киев: ИПМЭ, 1990. 58 с.
5. Васильев В.А., Пиганов М.Н., Зайцев В.Ю. Контроль качества полупроводниковых диодов по напряжению шума / Актуальные проблемы радиоэлектроники. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Под общ. ред. Ю.Ф. Широкова. Самара: СГАУ, 1999. Вып. 2. С. 63—65.
6. Разуменко Д. Низкочастотные шумы электронных компонентов как инструмент для диагностики внутренних дефектов // Компоненты и технологии. 2008. № 9 (86). С. 168—174.
7. Бордюжа О.Л. Диагностический контроль качества и надежности кремниевых биполярных интегральных схем / Дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 1998. 163 с.
8. Антонова Е.А. Влияние рентгеновского излучения на параметры полупроводниковых изделий / Дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 2013. 107 с.
9. Yang X., Chen Y.Q., Hou B., X. Xu, Wang J., Huang Y., Chen Q., Zhou C. Degradation Behavior and Defect Analysis for SiC Power MOSFETs Based on Low-Frequency Noise Under Repetitive Power-Cycling Stress // IEEE Transactions on Electron Devices. 2021. V. 68. No. 2. P. 666—671. DOI: 10.1109/TED.2020.3044018
10. Yang F., Liao M., Zeng B., Yang P., Chen Y. Investigation on the Degradation Mechanism of AlGaN/GaN HEMTs Under the Effect of Microwave Pulses at Different Powers / 2023 Global Reliability and Prognostics and Health Management Conference (PHM-Hangzhou), Hangzhou, China. 2023. P. 1—5. DOI: 10.1109/PHM-Hangzhou58797.2023.10482775
11. Якубович Б.И. Влияние проникающих излучений на электрический низкочастотный шум полупроводников // Успехи прикладной физики. 2021. № 3. С. 181—186.
12. Горлов М.И., Жарких А.Н. Способ определения потенциально ненадежных полупроводниковых изделий / Пат. № 2230335 РФ. Опубл. 10.06.2004. Бюл. № 16.
13. Горлов М.И., Жарких А.Н., Емельянов В.А. Способ определения потенциально ненадежных транзисторов / Пат. № 2234163 РФ. Опубл. 10.08.2004. Бюл. № 22.
14. Горлов М.И., Емельянов В.А., Жарких А.Н. Способ разбраковки полупроводниковых приборов / Пат. № 2253168 РФ. Опубл. 27.05.2005. Бюл. № 15.
15. Горлов М.И., Смирнов Д.Ю., Ануфриев Д.Л. Способ разделения полупроводниковых изделий по надежности. Пат. № 2298052 РФ. Опубл. 20.01.2007. Бюл. № 2.
16. Булгаков О.М., Таравков М.В. Статистический критерий оценки надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на основе характеристик низкочастотного шума // Вестник Воронежского института МВД России. 2012. № 3. С. 147—155.

REFERENCES

1. Gorlov M.I., Sergeev V.A. Testing Semiconductor Products Using Low-Frequency Noise Parameters // Defectoscopiya. 2022. No. 1. P. 13—25.
2. Zhigalsky G.P. Non-destructive quality control and prediction of reliability of integrated circuits by electrical noise and reliability parameters // Radio Engineering and Electronics. 2005. No. 5. P. 1—35.
3. Claeys C., Simoenl E., Agopian P.G.D., Martino J.A., Aoulaiche M., Cretus B., Fang W., Rooyackers R., Vandooren A., Veloso A., Jurczak M., Collaertl N., Thean A. The Smaller the noisier? Low frequency noise diagnostics of advanced semiconductor devices / 30-th Symp. Microelectron. Technol. Devices (SBMicro), Salvador, August 2015. <https://doi.org/10.1109/SBMicro.2015.72981044>
4. Romantsov V.P., Dolganov M.V. Prognozirovanie nadezhnosti integralnyh microsgem po parametram nizkochastotnogo shuma (Forecasting the reliability of integrated circuits based on low-frequency noise parameters). Kiev: IPME, 1990. 58 p.
5. Vasiliev V.A., Zaitsev V.Yu. Quality control of semiconductor diodes by noise voltage // Actual problems of radioelectronics. 1999. Is. 2. P. 63—65.
6. Razumenko D. Low-frequency noise of electronic components as a tool for diagnosing internal defects // Components and technologies. 2008. No. 9 (86). P. 168—174.
7. Bordyuzha O.L. Diagnostic quality control and reliability of silicon bipolar integrated circuits / Diss. ... Candidate of Technical Sciences. Voronezh: VSTU, 1998. 163 p.
8. Antonova E.A. The effect of X-ray radiation on the parameters of semiconductor products / Diss. ... Candidate of Technical Sciences. Voronezh: VSTU, 2013. 107 p.
9. Yang X., Chen Y. Q., Hou B., Xu X., Wang J., Huang Y., Y. Chen Y., Zhou C. Degradation Behavior and Defect Analysis for SiC Power MOSFETs Based on Low-Frequency Noise Under Repetitive Power-Cycling Stress // IEEE Transactions on Electron Devices. 2021. V. 68. No. 2. P. 666—671. DOI: 10.1109/TED.2020.3044018
10. Yang F., Liao M., Zeng B., Yang P., Chen Y. Investigation on the Degradation Mechanism of AlGaIn/GaN HEMTs Under the Effect of Microwave Pulses at Different Powers, 2023 Global Reliability and Prognostics and Health Management Conference (PHM-Hangzhou), Hangzhou, China, 2023. P. 1—5. DOI: 10.1109/PHM-Hangzhou58797.2023.10482775
11. Yakubovich B.I. Influence of penetrating radiation on electrical low-frequency noise of semiconductors // Uspehi prikladnoy fiziki Successes of applied Physics. 2021. No. 3. P. 181—186.
12. Gorlov M.I., Zharkikh A.N. A method for determining potentially unreliable semiconductor products / RF Patent No. 2230335. Byull. Izobret. 2004. No. 16.
13. Gorlov M.I., Zharkikh A.N., Yemelyanov V.A. A method for determining potentially unreliable transistors / RF Patent No. 2234163. Byull. Izobret. 2004. No. 22.
14. Gorlov M.I., Yemelyanov V.A., Zharkikh A.N. Method of disassembly of semiconductor devices / RF Patmt No. 2253168. Byull. Izobret. 2005. No. 15.
15. Gorlov M.I., Smirnov D.Y., Anufriev D.L. Method of separation of semiconductor products by reliability / RF Patent No. 2298052. Byull. Izobret. 2007. No. 2.
16. Bulgakov O.M., Taravkov M.V. Statistical criterion for assessing the reliability of semiconductor devices and integrated circuits based on low-frequency noise characteristics // Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2012. No. 3. P. 147—155.