НАТАЛЬЯ ИВАНОВА, НИКОЛАЙ ЗЕНЧЕНКО, НИКОЛАЙ ЩАВРУК, ВЯЧЕСЛАВ СТЫРАН, Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова РАН, Московский технологический университет (МИРЭА); natalia.ivanova.mipt@gmail.com, mail@isvch.ru

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЧ МИС С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОТОЛАКА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЙ ПЛОСКОСТИ НАД АКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ КРИСТАЛЛА

Статья посвящена решению задачи формирования заземляющей плоскости в СВЧ МИС на основе GaN на подложках сапфира. Предложено технологическое решение формирования заземляющей плоскости с использованием отечественного аналога полиимида над активной частью МИС. Проведены результаты испытаний изготовленных приборов.

В последнее десятилетие серьезное внимание в электронике уделяется разработке элементной базы СВЧ — техники и силовой электроники на основе нитридных соединений элементов III группы. Развитие указанных приборов определяется необходимостью освоения новых, более высоких частотных диапазонов, повышения мощности приборов, линейности их характеристик и улучшения эффективности.

Перспективы разработки следующего поколения СВЧ-техники связаны с прогрессом в развитии СВЧ-транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) на основе нитрида галлия (GaN), что обусловлено следующими преимуществами материала:

- более высокой проводимостью канала (плотность электронов до 1×10^4 см$^{-2}$, что на порядок выше, чем в гетероструктурах AlGaAs/GaAs);
- значительно большей пробивной напряженностью поля ($3{,}3\times10^6$ В/см для GaN против 4×10^5 В/см в GaAs);
- меньшей чувствительностью к температуре и радиации, чем в используемых в настоящее время структурах на основе классических соединениях типа A_3B_5;
- большей теплопроводностью, обеспечивающей возможность работы приборов при высоких мощностях и температурах [1].

На данный момент МИС на GaN преимущественно проектируют с помощью копланарной технологии, в то время как на GaAs используют как копланарную технологию, так и микрополосок. Пластины арсенида галлия легко утоняются и хорошо плазмохимически травятся, а гетероструктуры нитрида галлия растят преимущественно на особо твердых подложках — сапфира и карбида кремния, что вызывает серьезные трудности при обработке материала подложки [2, 3].

Одной из основных технологических трудностей является формирование заземляющих отверстий в подложке, как видно из таблицы 1, подложки сапфира и карбида кремния тяжело травятся плазмохимически.

Для преодоления данных ограничений предложено конструкторско-технологическое решение [5, 6] заключающееся в размещении земляной плоскости не на обратной стороне пластины, а на лицевой, поверх активной части МИС через слой фоточувствительного полимера (рис. 1).

Данные полимеры должны отличаться хорошей адгезией к подложкам и материалам поликор, сапфир, GaAs, Al/Si, Cr/Si, Au/Si/Ni/Si, обладать хорошими планаризующими свойствами, иметь высокую химическую стойкость к органическим и неорганическим соединениям, температурную стабильность до +350 °C, низ-

Таблица 1. **Характерные параметры ICP-травления наиболее применяемых подложек для СВЧ МИС**

Материал	Скорость травления	Селективность к ФР
Al_2O_3	> 0,65 мкм/мин	> 0,7:1
SiC	> 0,3 мкм/мин	> 0,5:1
GaAs	> 4 мкм/мин	> 12:1

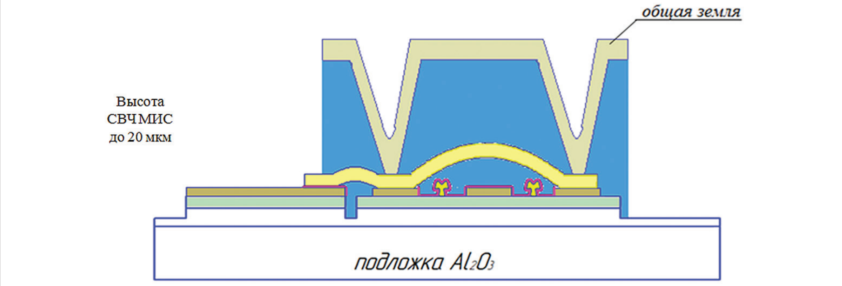

Рис. 1. Поперечное сечение пластины с межэлектрическими соединениями, обеспечивающими общую заземляющую плоскость

кую диэлектрическую проницаемость. Указанными характеристиками обладают полиимиды и их аналоги [7].

Применение этих фотополимеров не требует специального оборудования, работа с ними осуществляется на стандартных установках нанесения фоторезистов и литографических установках [8, 9]. В случае необходимости рисунок на фотополимере можно формировать при помощи кислородной плазмы. Благодаря этому удается решить проблему формирования заземляющей плоскости без привлечения дополнительного дорогостоящего оборудования.

При использовании полиимида в технологическом процессе возникает ряд сложностей — существенное влагопоглощение, большой коэффициент теплового расширения, требовательность к температурному режиму хранения (+23 °C — 1 мес.; –16 °C — 9 мес.), малый срок годности готового фоточувствительного полиимида. Однако был найден отечественный аналог полиимида — фотолак термостойкий прозрачный (ФЛТП), изготовленный в ИВС РАН. Его основные преимущества: длительный

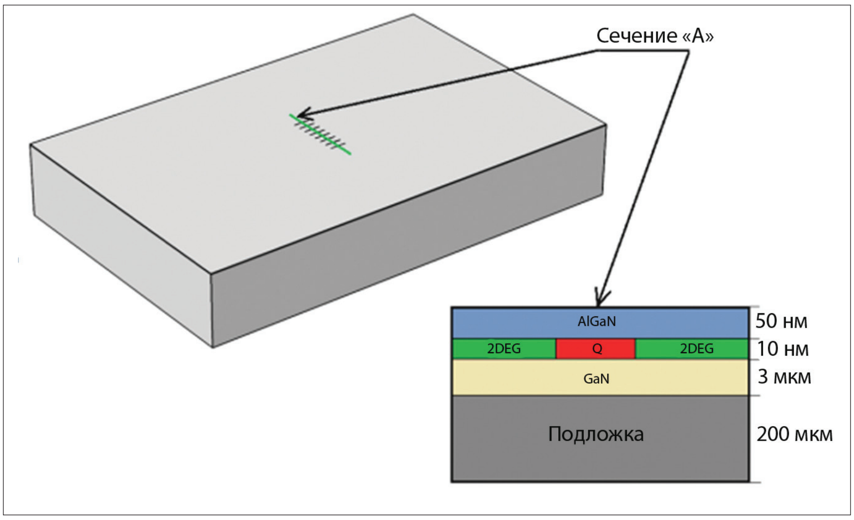

Рис. 2. Модель кристалла СВЧ МИС, где 2DEG — двумерный электронный газ, Q — область, выделяющая тепло

Таблица 2. **Свойства материалов СВЧ МИС**

Материал	Функция в модели	Плотность, кг/м^3	Теплопроводность, Вт/м·К	Теплоемкость, Дж/кг·К
GaN	гетероструктура	6070	130	490
AlGaN		5184	40	604
Al_2O_3	подложка	3965	35	730
ФЛТП	покрытие	1350	0,2	900

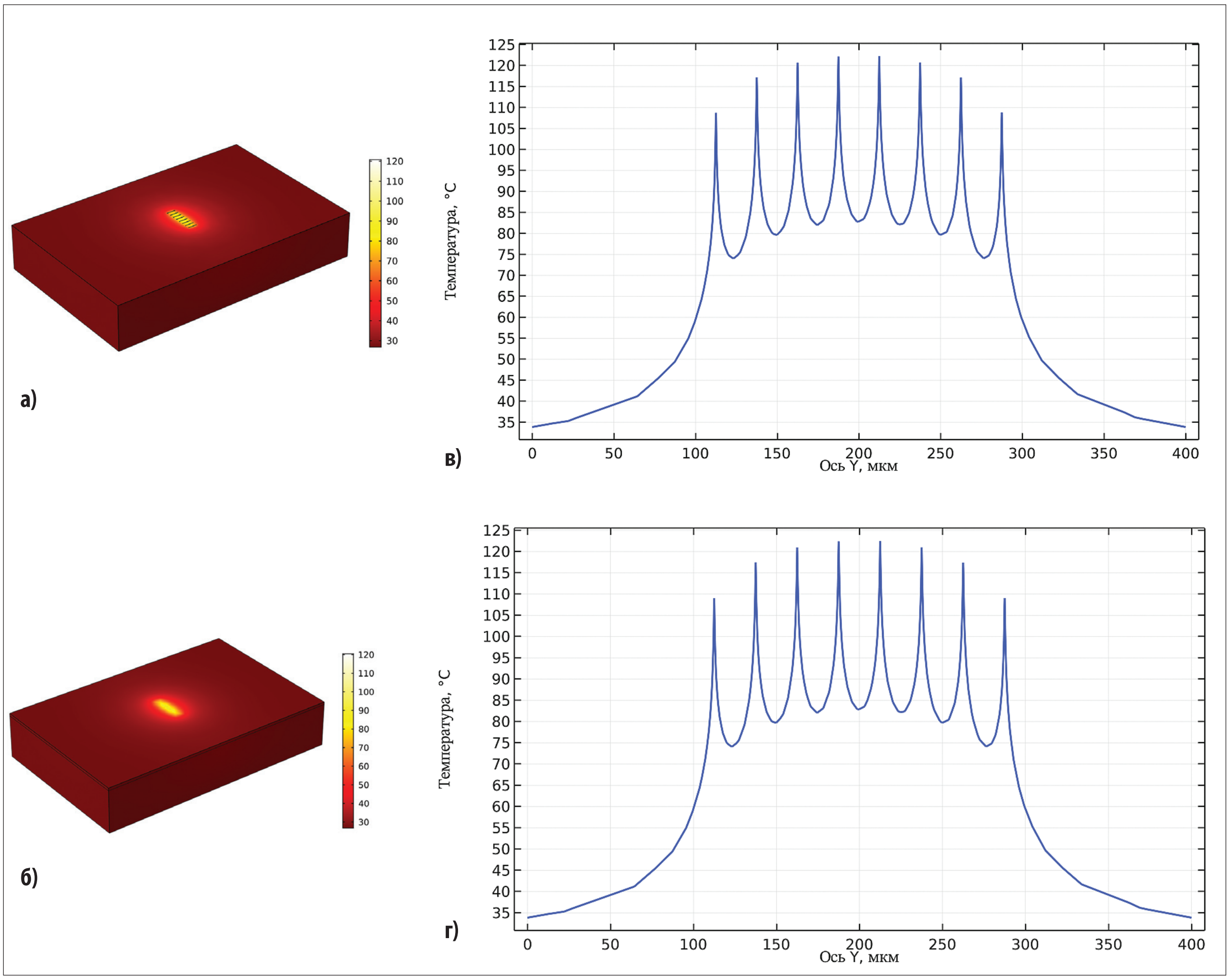

Рис. 3. Поверхностное распределение температуры в модели: а) без ФЛТП; б) с покрытием ФЛТП. Распределение температуры на поверхности МИС в районе затворов в модели: в) без ФЛТП; г) с покрытием ФЛТП

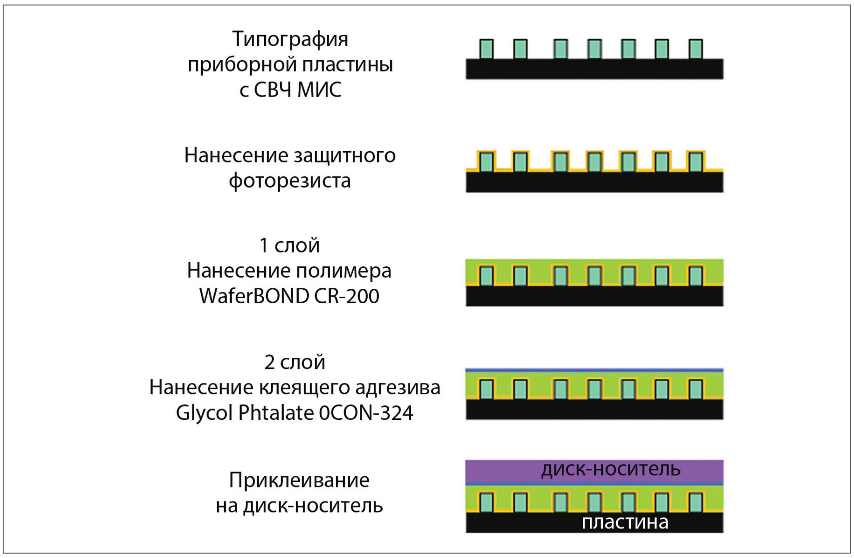

Рис. 4. Порядок приклеивания приборных пластин сапфира и карбида кремния с изготовленными на них СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN на диск-носитель

срок хранения при комнатной температуре (+23 °C — 6 мес.), возможность гибкого изменения характеристик под нужды заказчика [10, 11].

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЧ МИС С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОТОЛАКА

Для определения тепловых режимов работы СВЧ МИС с верхней «землей» было проведено математическое моделирование тепловых процессов, проходящих в СВЧ МИС, методом конечных элементов.

СВЧ МИС представляет собой усилитель мощности, основным элементов которого является восьмизатворный транзистор. Кристалл МИС с изображенными на нем источниками тепла — подзатворными областями Q — схематично приведен на рис. 2.

В данной тепловой модели транзистора источником тепла служит подзатворная часть канала Q.

Контакт между слоями задан идеальным. Выделенная красным область была задана как объект, генерирующий тепло.

В расчетах использовалось уравнение теплопроводности:

$$C_p\rho\frac{\partial T}{\partial \tau}=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+q_v, \quad (1)$$

где q_v — мощность внутреннего источника тепла; λ — коэффициент теплопроводности; ρ — плотность вещества; C_p — теплоемкость вещества при постоянном давлении; T — температура в процессе работы.

Данное дифференциальное уравнение (1) решается методом конечных элементов при граничных условиях третьего рода:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_S=-\frac{\alpha}{\lambda}(T-T_C), \quad (2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; T_c — температура окружающего пространства; n — модуль вектора нормали.

Свойства материалов, послужившие в качестве исходных данных для компьютерного моделирования, представлены в таблице 2.

В расчетах были приняты следующие условия:

- теплоотвод идеальный (принудительно задана температура для дна подложки +27 °C);
- температура окружающей среды и начальная температура объекта +27 °C.

Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Максимальный нагрев активной области транзистора в случае добавления ФЛТП уменьшился на 0,5%. Такое незначительное изменение связано с тем, что ФЛТП имеет низкую теплопроводность, что минимизирует количество отводимого им тепла.

Согласно результатам моделирования, введение в трехмерную модель ФЛТП существенно не влияет на максимальный нагрев подзатворной области. В случае модели с применением ФЛТП максимальный нагрев достиг +122,1 °C, а в случае без ФЛТП +122,4 °C, что составило менее 0,1%.

Одна из особенностей изготовления СВЧ МИС с применением ФЛТП — утонение и разделение пластины на кристаллы. Это связано с развитым рельефом поверхности пластины со сформированными СВЧ МИС, который нуждается в защитных слоях при проведении процесса утонения пластины.

Для обеспечения защиты лицевой поверхности пластины было предложено и опробовано решение, показанное на рис. 4.

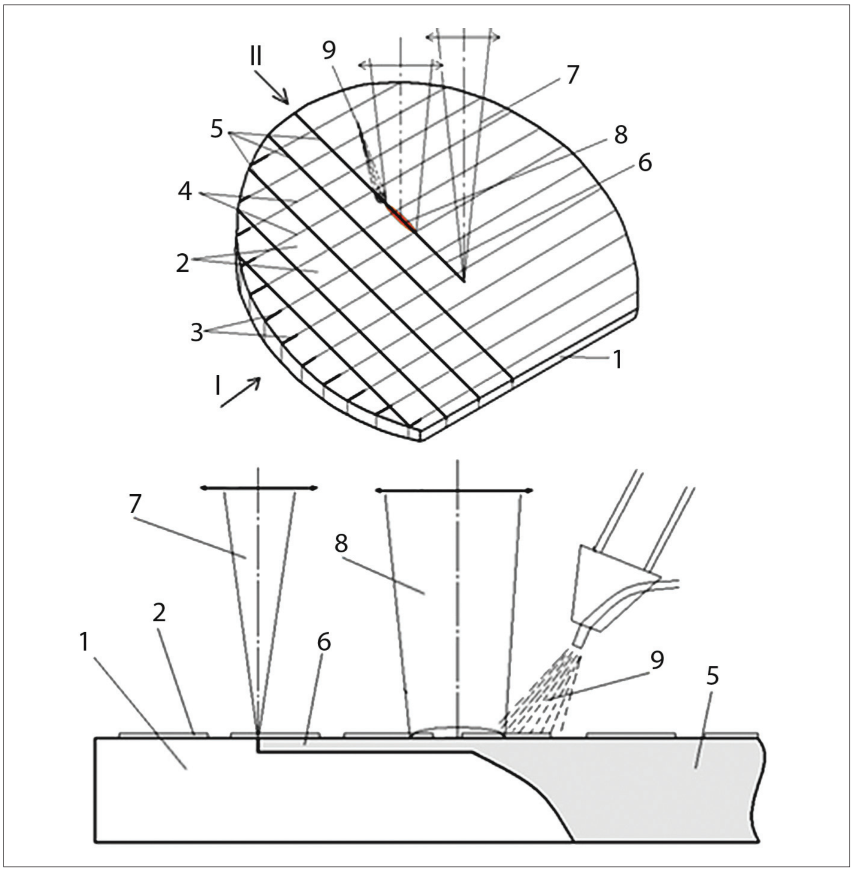

Рис. 5. Схема разделения приборных пластин со сформированными МИС на кристаллы методом ЛУТ

Представленное решение обеспечивает химическую и температурную совместимость защитного и клеящего полимера, что создает надежную защиту СВЧ МИС при операциях монтажа пластины на диск-носитель и при шлифовке и полировке пластины. В результате операции шлифовки и полировки пластины диаметром 2 дюйма разброс по толщине не превышает 2 мкм, а шероховатость после полировки Ra — 1,86 нм.

Для операции разделения пластины на отдельные МИС был использован ЛУТ — метод лазерного управляемого термораскалывания (рис. 5). Как сказано нами в ранее опубликованной статье [12], «для обеспечения резки в первом направлении (I) на краю пластины наносятся короткие надрезы (3), которые являются концентраторами напряжений и обеспечивают зарождение и продвижение разделяющих трещин (4). Перед резкой во втором направлении (II), чтобы получить сквозные разделяющие трещины (5) при помощи сфокусированного луча УФ-лазера (7) с длиной волны 355 нм наносят неглубокий надрез (6) по всей длине реза либо в местах пересечений с линиями реза (4). Глубина и ширина надреза составляет соответственно 5–9 мкм и 5–7 мкм. Нагревая линию надреза (6) лазерным лучом (8) при помощи CO_2-лазера мощностью до 50 Вт и затем охлаждая зону нагрева хладагентом (9), получаем сквозную разделяющую трещину (5). Скорость резки методом ЛУТ сапфировой пластины достигала 400–450 мм/с».

По результатам использования метода ЛУТ были рассчитаны ключевые параметры процесса резки — для дорожки реза шириной 200 мкм выход годных при резке пластины составил не менее 92%.

В ИСВЧПЭ РАН изготовлены образцы МИС СВЧ для диапазонов 57–64 и 32–36 ГГц с применением топологического решения в виде «земляной» плоскости над активной поверхностью МИС, с использованием фотолака. Данные образцы успешно прошли испытания на стойкость к специальным факторам 7.$И_1$, 7.$И_6$ (7.$И_8$), 7.$И_7$, $К_{12}$ [13].

Авторы считают, что в настоящей работе новыми являются следующие положения и результаты: предложен метод формирования заземляющей плоскости для МИС на основе гетероструктур AlGaN/GaN на особо твердых подложках. Представлен отечественный аналог полиимида, для которого проведены расчеты теплового режима активных элементов СВЧ МИС. Эти приборы успешно прошли испытания на специальные факторы (7.$И_1$, 7.$И_6$ (7.$И_8$), 7.$И_7$, $К_{12}$) без кратковременной потери работоспособности, что показывает применимость фотолака для изготовления радиационно стойкой ЭКБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Балакирев А., Туркин А. Развитие технологии нитрида галлия и перспективы его применения в СВЧ-электронике//Современная электроника. 2015. № 42.*
2. *Добуш И. М., Коколов А. А., Бабак Л. И. Исследование копланарных элементов монолитных интегральных схем//Доклады ТУСУРа. 2010. Ч. 1. № 2 (22).*
3. *Iulian Rosu Microstrip, Stripline, and CPW Design. www.qsl.net/va3iul*
4. *www.oxford-instruments.com*
5. *Гамкрелидзе С. А., Мальцев П. П., Федоров Ю. В. Монолитные СВЧ ИС миллиметрового диапазона на основе нитридных гетероструктур с интегрированными антенными элементами//Известия вузов. Электроника. 2017. Т. 22. № 6.*
6. *Федоров Ю. В., Павлов А. Ю., Павлов В. Ю., Арутюнян С. С., Иванова Н. Е., Томош К. Н., Михалев А. О. Разработка базовой технологии создания монолитных интегральных схем УМ и МШУ на нитридных наногетероструктурах для ППМ. Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC-2015). Ч. 4. М.: МИРЭА, 2015.*
7. *Петрова Т. С. Формирование полиимидных межслойных изолирующих слоев ИС на GaAs. Научная сессия ТУСУР-2004. Материалы всероссийской научно-технической конференции. Томск, 2004.*
8. *Бугаев А. С., Енюшкина Е. Н., Арутюнян С. С., Иванова Н. Е., Глинский И. А., Томош К. Н. Разработка технологии формирования общей «земли» на активной оверхности монолитной интегральной схемы усилителя мощности на нитридных гетероструктурах. Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC-2016). Ч. 4. М.: МИРЭА, 2016.*
9. *Иванова Н. Е., Крапухин Д. В. Применение высокотемпературного фотополимера для формирования общей «земли» на активной поверхности МИС СВЧ на нитридных гетероструктурах. Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC-2017). Ч. 3. М.: МИРЭА, 2017.*
10. *Н. Е. Иванова, Н. В. Щаврук. Формирование заземляющей плоскости в СВЧ МИС на основе GaN. Сборник докладов Российской научно-технической конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике». М.: МИРЭА, 2018.*
11. *Иванова Н. Е., Гнатюк Д. Л., Щаврук Н. В. Метод формирования заземляющей плоскости в МИС на основе нитрида галлия. Сборник трудов Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения». М.: НИЯУ МИФИ, 2018.*
12. *Shchavruk N. V., Redkin S. V., Trofimov A. A., Ivanova N. E., Skripnicenko A. S., Kondratenko V. S., Stiran V. V. Partitioning Very Hard semiconductor sapphine wafers into monolithic integrated circuits using laser controlled thermal cleavage//Russian microelectronics. 2017. Vol. 46. No.3.*
13. *Арутюнян С. С., Кагирина К. А., Лаврухин Д. В., Иванова Н. Е., Гамкрелидзе С. А. Устойчивость нитридных СВЧ монолитных интегральных схем преобразователя сигнала к облучению потоком нейтронов и гамма-излучению//Известия вузов. Электроника. 2016. Т. 21. № 5.*