

ISSN 1813-8586

НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

- Нанотехнологии
- Зондовая микроскопия
- Микромашины и наносистемы
- Молекулярная электроника
- Биоактивные нанотехнологии
- Элементы датчиков и биочипы
- Микроэлектромеханические системы
- Микрооптоэлектромеханические системы
- Биомикроэлектромеханические системы

Том 22. № 6. 2020



Рисунки к статье А. М. Темнова

«ГИБРИДНО-МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СВЧ НА АЛМАЗЕ»

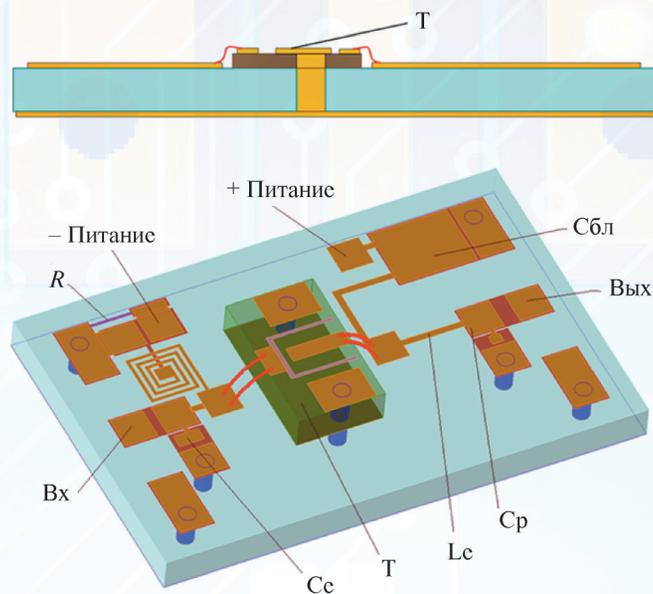


Рис. 1. ГМИС СВЧ на алмазной плате – усилитель мощности на ПТШ

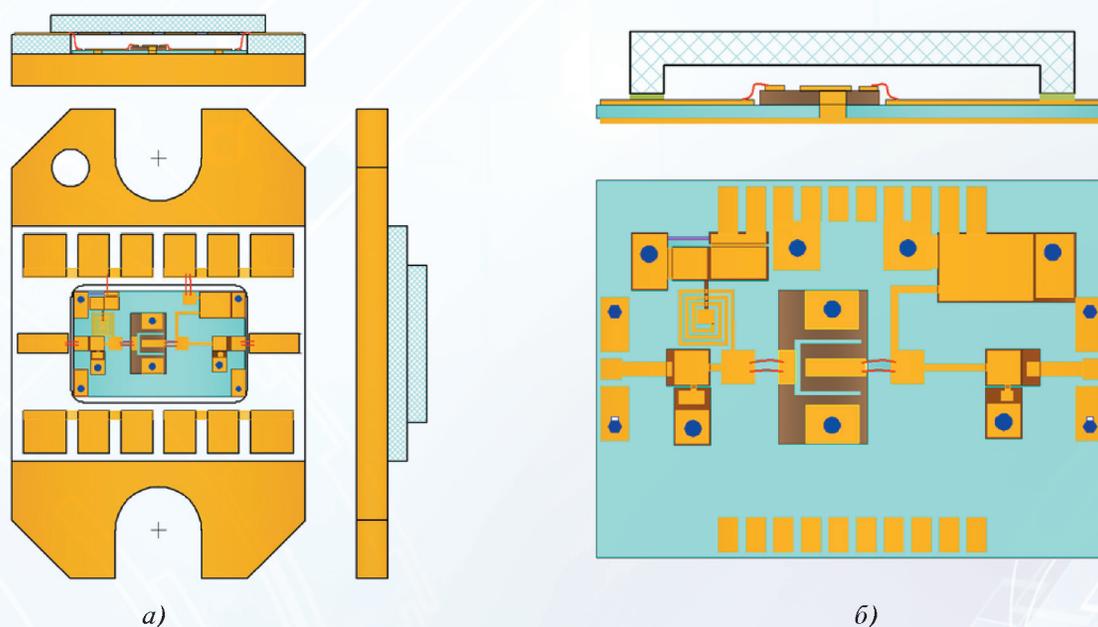


Рис. 2. ГМИС СВЧ на алмазной плате:
a – традиционная конструкция; *б* – новая конструкция с объемной алмазной крышкой из ПАП

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 22. № 6 ✧ 2020

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал включен в международные базы данных на платформе Web of Science: Chemical Abstracts Service (CAS), которая входит в Medline, и Russian Science Citation Index (RSCI).

Журнал индексируется в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и включен в международную базу INSPEC.

Журнал включен в Перечень международных реферируемых баз данных по научному направлению 02.00.00 химические науки

и в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным направлениям: 01.04.00 физика, 05.27.00 электроника.

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук

Статьи имеют DOI

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

Квардаков В. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Кульчин Ю. Н., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Лабунин В. А., д.т.н., проф., акад. НАНБ (Беларусь)

Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Сауров А. Н., д.т.н., проф., акад. РАН

Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., акад. РАН

Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь)

Андреев А., к.ф.-м.н. (Великобритания)

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай)

Басаев А. С., к.ф.-м.н.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Дайнеко А. В., к.х.н.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Кузнецов В. И., д.т.н. (Нидерланды)

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

Панин Г. Н., к.ф.-м.н., проф. (Южная Корея)

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония)

Сантос Э. Х. П., PhD, Ful. Prof. (Бразилия)

Сингх К., к.т.н. (Индия)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенко С. П., д.т.н.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н., доц.

Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Чугунова А. В. (науч. ред.)

Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Зенченко Н. В., Гнатюк Д. Л., Зуев А. В., Крапухин Д. В., Мальцев П. П., Щеглова Т. А. Применение аддитивных технологий при исследованиях электромагнитных волн миллиметрового диапазона . . . 295

Темнов А. М. Гибридно-монокристалльные интегральные схемы СВЧ на алмазе 298

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Булярский С. В., Светухин В. В. Образование нанокристаллов кремния после ионного легирования оксида кремния 329

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Алешин А. Н., Рубан О. А. Деградиационные процессы в программируемой металлизированной ячейке. Явление и причины его возникновения 335

Аннотации и статьи на русском и английском языках доступны на сайте журнала (<http://microsystems.ru>; <http://novtex.ru/nmst/>) в разделе "Архив статей с 1999 г."

ПОДПИСКА:

по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)

в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки:

107076 Москва,

Стромынский пер., д. 4

e-mail: nmst@novtex.ru

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 22

No. 6

2020

CHIEF EDITOR

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA)

Editorial council:

Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Cor.-Mem. RAS
Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Kvardakov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Labunov V. A. (Belorussia), Sci. (Tech.), Acad. NASB
Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Ryzhii V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Saurov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS
Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS

Editorial board:

Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Baklanov M. R., Dr. Sci. (Chem.), Prof. (China)
Basaev A. S., Cand. Sci. (Phys.-Math.)
Dayneko A. V., Cand. Sci. (Tech.)
Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)
Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Ass. Prof.
Kuznetsov V. I., Dr. Sci. (Tech.) (Netherlands)
Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Panin G. N., PhD, Prof. (South Korea)
Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.)
Ryzhii M. V., (Japan), Dr. Eng., Prof.
Santos E. J. P., PhD, Prof. (Brasil)
Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shashkin V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Singh K., PhD (India)
Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.)
Vikulin V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial staff:

Antonov B. I. (Director Publ.)
Lysenko A. V. (Executive secretary)
Chugunova A. V. (Research Editor)
Shchetinkin D. A. (site)

The Journal is included in the international databases of the chemical sciences — Chemical Abstracts Service (CAS) and of the engineering sciences — INSPEC, and it is also indexed in the Russian Science Citation Index (RSCI) based on the Web of Science platform. The Journal is included in the Russian System of Science Citation Index and the List of Journals of the Higher Attestation Commission of Russia. Its articles have DOI and are printed in the Journal in Russian and English languages. The Journal is published under the scientific-methodical guidance of the Branch of Nanotechnologies and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences.

CONTENTS

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Zenchenko N. V., Gnatyuk D. L., Zuyev A. V., Krapukhin D. V., Maltsev P. P., Shcheglova T. A. Additive Technologies in the Researches of Ultrahigh Frequency Electromagnetic Waves 295

Temnov A. M. Hybrid Monolithic Microwave Integrated Circuits RF on Diamond 298

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Bulyarskiy S. V., Svetukhin V. V. Solubility of Impurities in Silicon Nanocrystals 329

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Aleshin A. N., Ruban O. A. Degradation Processes in Programmable Metallization Cell. Phenomenon and Reasons of it Appearance . . . 335

Web: www.microsystems.ru/eng; e-mail: nmst@novtex.ru

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ MNST SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

УДК 621.382.323

DOI: 10.17587/nmst.22.295-298

Н. В. Зенченко, науч. сотр., Zenchenko.Nikolay@yandex.ru, **Д. Л. Гнатюк**, канд. техн. наук, зав. лаб., **А. В. Зуев**, науч. сотр., **Д. В. Крапухин**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **П. П. Мальцев**, д-р техн. наук., науч. руководитель, **Т. А. Щеглова**, инж.-исследователь, Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Москва

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Поступила в редакцию 20.04.2020

Приведен пример применения аддитивных технологий (3D-печать) в исследованиях затухания электромагнитных волн миллиметрового диапазона частот (50...67 ГГц) на пластинах кремния и CVD-алмаза, а также примеры использования подобных технологий при создании измерительных стендов и обеспечении процесса измерений.

Ключевые слова: аддитивные технологии, затухание, миллиметровый диапазон частот, кремний, CVD-алмаз, 3D-печать

Введение

При проведении широкой номенклатуры исследований, связанных с распространением электромагнитных волн, всегда требуется разработка измерительной оснастки под каждый отдельный исследуемый случай. Коммерческие образцы элементов оснастки не всегда можно получить в сжатые сроки, что сильно замедляет процесс исследований. Аддитивные технологии позволяют существенно снизить временные затраты на создание измерительных стендов, предназначенных для проведения исследований в области СВЧ полупроводниковой электроники, так как дают возможность непосредственно на месте изготавливать необходимые элементы ос-

настки по индивидуальным проектам в сжатые сроки. В данной работе рассматривается пример применения аддитивных технологий при исследованиях затухания электромагнитных волн диапазона частот 50...67 ГГц на пластинах кремния и CVD-алмаза [1].

Создание трехмерной модели и выбор материала

Для обеспечения проведения измерений затухания электромагнитных волн на пластинах кремния и CVD-алмаза требовалось создать оснастку для закрепления двух рупорных антенн [2], а также пластины исследуемого материала в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.

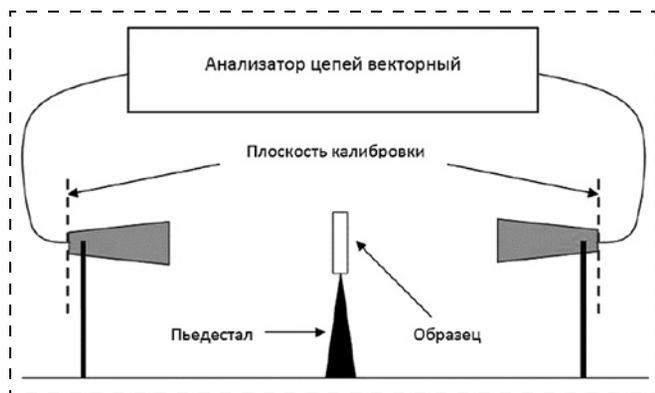


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

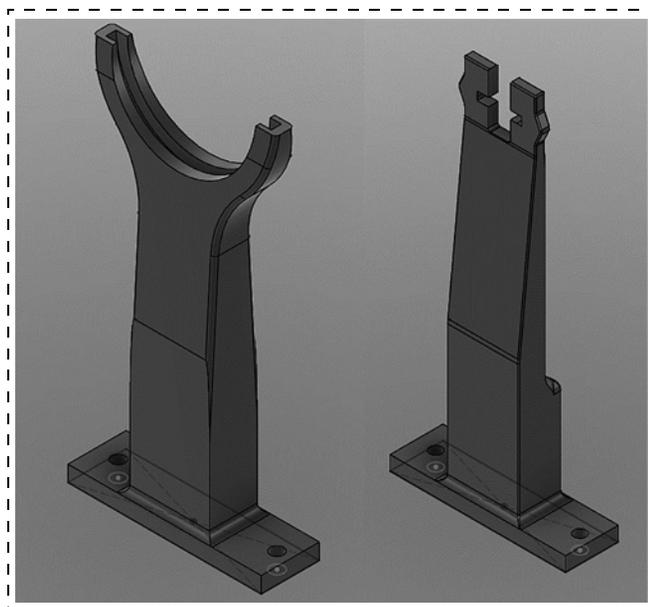


Рис. 2. Трехмерные модели держателя пластин и рупорных антенн

Экспериментальная установка состоит из двух рупорных антенн Dorado GH-15-20 с рабочим диапазоном частот 50...75 ГГц [3], между которыми в оснастке закрепляется пластина из кремния или CVD-алмаза. Были созданы трехмерные модели, адаптированные под использование данных антенн, а также отдельная модель для крепления пластин. На рис. 2 показаны трехмерные модели оснастки для закрепления рупорных антенн и пластин.

Далее, для начала непосредственно процесса 3D-печати данные модели были загружены в программу-слайсер, которая позволяет интерпретировать трехмерную модель деталей в виде набора команд для движения печатающей головки 3D-принтера [4]. На рис. 3 представлена визуализация кода движения 3D-принтера при создании держателя рупорной антенны.

- Были выбраны следующие параметры печати:
- материал — PLA;
 - температура печатающей головки — 205 °C;
 - температура нагревательного стола — 65 °C;
 - диаметр сопла печатающей головки — 400 мкм;
 - толщина слоя — 150 мкм;
 - ширина линии — 400 мкм;
 - число линий стенки — 3.

Приведенные выше параметры позволили обеспечить достаточную прочность итоговых изделий.

На рис. 4 представлена фотография станда, собранного на основе деталей, напечатанных на 3D-принтере Anycubic i3 Mega.

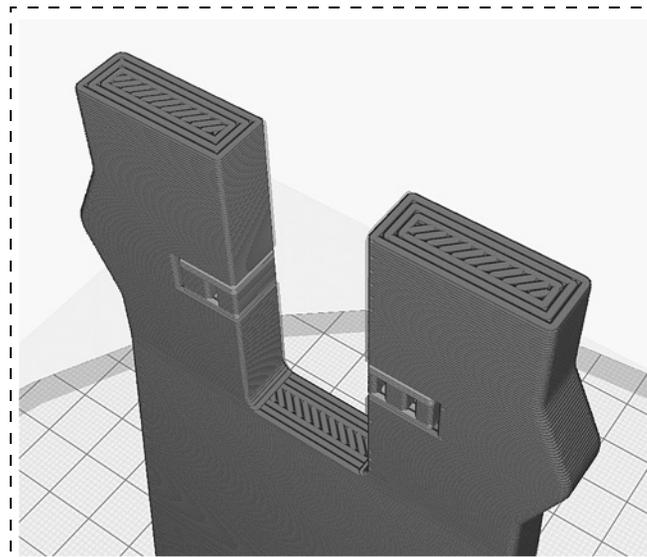


Рис. 3. Визуализация кода управления движением 3D-принтера

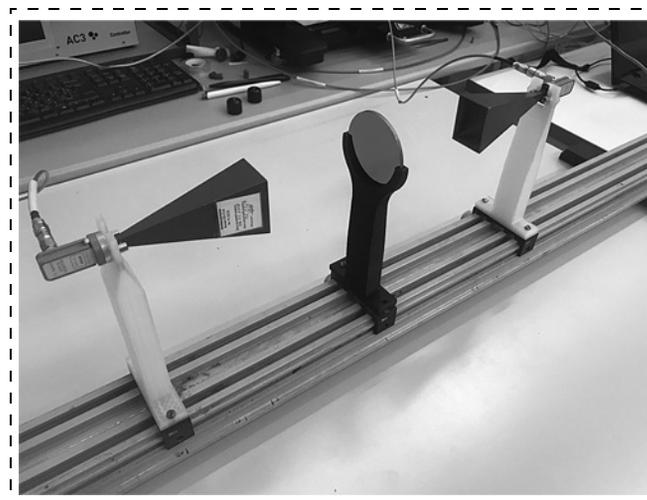


Рис. 4. Внешний вид измерительного станда для исследования уровня затуханий электромагнитных волн

Заключение

Аддитивные технологии позволяют существенно снизить временные затраты на создание измерительных стендов, предназначенных для проведения исследований в области СВЧ полупроводниковой электроники, так как дают возможность непосредственно на месте изготавливать необходимые элементы оснастки по индивидуальным проектам в сжатые сроки. На примере данной работы показано, что при исследованиях затухания электромагнитных волн на пластинах кремния и CVD-алмаза технологии 3D-печати могут существенно упростить работу по созданию измерительных стендов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 19-07-00683 А.

Список литературы

1. **Гарин Б. М., Копнин А. Н., Паршин В. В.** и др. О потерях в алмазе в миллиметровом диапазоне // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, № 7–8. С. 85–89.
2. **Parkhomenko M. P., Kalenov D. S., Fedoseev N. A.** et. al Measurement of the complex permittivity of polycrystalline diamond by the resonator method in the millimeter range // Physics of Wave Phenomena. 2015. Vol. 23, N. 3. P. 1–6.
3. **Федоров Ю. В., Бугаев А. С., Гнатюк Д. Л.** и др. Макетирование приемо-передающих модулей 5-миллиметрового диапазона длин волн на базе отечественных монолитных интегральных схем на нитриде галлия // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 12. С. 702–708.
4. **Дашков А. В., Щаврук Н. В., Щеглова Т. А.** и др. Апробация способа изготовления контейнеров из антистатического материала для полупроводниковых кристаллов сложной формы на основе 3D-печати // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 9. С. 551–555.

N. V. Zenchenko, Junior Researcher, Zenchenko.Nikolay@yandex.ru,
D. L. Gnatyuk, Ph. D., Head of Laboratory, **A. V. Zuyev**, Researcher,
D. V. Krapukhin, Researcher, **P. P. Maltsev**, D. Sc., Professor, Research Supervisor,
T. A. Shcheglova, Engineer-researcher,
V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Science (IUHFSE RAS), Moscow, 117105, Russian Federation

Corresponding author:

Zenchenko Nicolay V., Junior Researcher, V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Science (IUHFSE RAS), Moscow, 117105, Russian Federation
E-mail: Zenchenko.Nikolay@yandex.ru

Additive Technologies in the Researches of Ultrahigh Frequency Electromagnetic Waves

Received on April 20, 2020

Accepted on April 28, 2020

The paper provides an example of the use of additive technologies (3D printing) in researches of the attenuation of electromagnetic waves on wafers of silicon and CVD diamond, as well as examples of the use of such technologies in the creation of research stands and ensuring the measurement process.

Keywords: additive technologies, attenuation, millimeter wavelenght, Silicon, CVD-diamond, 3D-printing

For citation:

Zenchenko N. V., Gnatyuk D. L., Zuyev A. V., Krapukhin D. V., Maltsev P. P., Shcheglova T. A. Additive Technologies in the Researches of Ultrahigh Frequency Electromagnetic Waves, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 6, pp. 295–298.

DOI: 10.17587/nmst.22.295-298

References

1. **Garin B. M., Kopnin A. N., Parshin V. V., Ral'chenko V. G., Chigryaj E. E., Konov V. I., Mazur A. B., Parhomenko M. P.** O poteryah v almaze v millimetrovom diapa-

zone, *Pis'ma v ZHTF*, 1999, vol. 25, no. 7–8, pp. 85–89 (in Russian).

2. **Parkhomenko M. P., Kalenov D. S., Fedoseev N. A., Eremin I. S., Ral'chenko V. G., Bol'shakov A. P., Ashkinazi E. E., Popovich A. F., Balla V. K., Mallik A. K.** Meas-

urement of the complex permittivity of polycrystalline diamond by the resonator method in the millimeter range, *Physics of Wave Phenomena*, 2015, vol. 23, no. 3. pp. 1–6.

3. Fedorov Yu. V., Bugayev A. S., Gnatyuk D. L., Pavlov A. Yu., Matveyenko O. S., Pavlov V. Yu., Slapovsky D. N., Tomosh K. N., Enyushkina E. N., Galiyev R. R., Maytama M. V., Zuev A. V., Krapukhin D. V., Gamkrelidze S. A., Putintsev B. G., Maltsev P. P. Prototyping of V-band Trans-

mit-Receive Modules on the Basis of the Domestic Monolithic Integrated Circuits on Gallium Nitride, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 12, pp. 702–708 (in Russian).

4. Dashkov A. V., Shchavruk N. V., Shcheglova T. A., Tarasov N. S., Maltsev P. P., Khabibullin R. A. Approbation of 3D Printing Containers for Semiconductor Dice of Complex Shapes from Antistatic Material, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 9, pp. 551–555 (in Russian).

УДК 621.372

DOI: 10.17587/nmst.22.298-328

А. М. Темнов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., alexandertemnov@mail.ru,
АО Научно-производственное предприятие «Исток» им. А. И. Шокина,
Фрязино, Московская обл., 141190, Российская Федерация

ГИБРИДНО-МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СВЧ НА АЛМАЗЕ

Поступила в редакцию 27.03.2020

Описаны созданные мощные усилительные гибридно-монокристаллические интегральные схемы (ГМИС) СВЧ на алмазной плате, в том числе поверхностного монтажа. Разработаны технологические процессы изготовления алмазных плат из поликристаллической алмазной пленки (ПАП) по групповой планарной технологии и прецизионной литографии, объемных алмазных крышек из ПАП, а также технологический процесс разделения гетеропластины (ПАП-Si) и отделения целой пластины ПАП от жертвенного кремния. Показано, что плазмохимическое травление обеспечивает групповое изготовление отверстий на основе планарной технологии и прецизионной литографии. Оптимизированы технологические режимы травления отверстий через алюминиевую маску методом реактивного ионного травления с источником индуктивно связанной плазмы (РИТ-ИСП). Найдена математическая модель технологического процесса и показано, что травление происходит преимущественно в среде кислорода. Исследована возможность травления отверстий в ПАП диаметром 100 мкм и глубиной более 300 мкм. Показано, что скорость травления зависит от глубины отверстий и носит нелинейный характер.

Ключевые слова: гибридно-монокристаллические интегральные схемы (ГМИС) СВЧ на алмазной плате; гетеропластина (ПАП-Si); поликристаллическая алмазная пленка (ПАП) на жертвенном кремнии; технологический процесс изготовления монокристаллических алмазных плат; технологический процесс изготовления объемных алмазных крышек из ПАП; плазмохимическое травление отверстий; металлизация отверстий с вертикальной стенкой

Введение

Анализ известных конструктивно-технологических решений для мозаичных ГИС и ГМИС СВЧ показал, что их общим недостатком является низкая теплопроводность платы и невозможность размещения на плате мощных активных компонентов — кристаллов полевых транзисторов с барьером Шоттки (ПТШ) и МИС СВЧ, что приводит к снижению интеграции и увеличению массогабаритных характеристик. Для повышения интеграции ГИС и ГМИС СВЧ мозаичной конструкции появилась необходимость в поиске новых конструктивно-технологических решений для ГМИС СВЧ.

Новые конструктивно-технологические решения целесообразно было искать на пути совершенствования ГИС и ГМИС СВЧ мозаичной

конструкции: перехода к одноплатной конструкции; повышения теплопроводности платы; изготовления металлизированных отверстий в плате. Эти задачи охватывали комплекс вопросов теоретического, конструктивного и технологического характера.

1. Конструкция ГМИС на алмазе

В соответствии с предложенной концепцией для преодоления перечисленных выше недостатков, присущих мощным усилительным ГИС и ГМИС СВЧ мозаичной конструкции, новое конструктивно-технологическое решение ГМИС СВЧ должно было обеспечить:

1) размещение на одной диэлектрической плате всех пассивных элементов и кристаллов мощных активных компонентов;

2) изготовление всей монолитной пассивной части ГМИС СВЧ на одной диэлектрической плате по групповой планарной технологии и прецизионной литографии.

В 2012 г. впервые в отечественной и зарубежной практике автором было предложено новое конструктивно-технологическое решение для мощной усилительной ГМИС СВЧ на одной монолитной алмазной плате из поликристаллической алмазной пленки (ПАП) [1–3], имеющей теплопроводность более 1000 Вт/(м·К) и относительную диэлектрическую проницаемость 5,7 ед.

Зарубежное название ПАП — NCA — нанокристаллический алмаз. Сообщений о создании за рубежом аналогичных ГМИС СВЧ на одной алмазной плате из ПАП пока не появилось. Конструкция ГМИС СВЧ на одной алмазной плате — однокаскадного усилителя мощности на ПТШ показана на рис. 1, см. вторую сторону обложки.

ГМИС СВЧ — однокаскадный усилитель мощности — выполнен на одной диэлектрической алмазной плате из ПАП. На алмазной плате размещены все пассивные элементы схемы (R , L , C), межсоединения, выводы, а также навесной активный компонент (кристалл полевого транзистора T), на обратной стороне платы — металлизационное покрытие, а в объеме платы — сквозные металлизированные отверстия.

Вся пассивная часть ГМИС СВЧ, содержащая элементы (R , L , C), межсоединения, выводы, изготовлена на монолитной алмазной плате из ПАП по групповой планарной технологии и прецизионной литографии.

Кристалл активного компонента монтируется на алмазную плату ГМИС СВЧ и соединяется с платой посредством проволочных проводников.

Таким образом, новое конструктивно-технологическое решение ГМИС СВЧ на алмазной плате позволило преодолеть недостатки, присущие мозаичным конструкциям ГИС и ГМИС СВЧ, и обеспечило:

1) возможность размещать на одной стороне алмазной платы мощные активные компоненты и все пассивные (R , L , C) элементы, межсоединения и выводы, на обратной стороне платы — металлизационное покрытие, а в объеме платы — металлизированные отверстия;

2) интеграцию на алмазную плату навесных мощных и маломощных кристаллов диодов,

транзисторов и МИС СВЧ различного назначения, в том числе изготовленных из различных материалов (Si, GaAs, InP, GaN, C и др.);

3) планарность конструкции, необходимую для применения современных методов групповой обработки, планарной технологии и прецизионной литографии, в том числе в условиях массового производства.

Интеграция всех элементов и компонентов схемы на одной алмазной плате позволяет получить высокие СВЧ параметры, повысить надежность, уменьшить массу, габаритные размеры и стоимость изготовления ГМИС СВЧ.

ГМИС СВЧ на алмазной плате не защищены от воздействия пыли и грязи, и их необходимо герметизировать в корпус.

Для корпусирования можно использовать как традиционную конструкцию ГМИС СВЧ, так и новое конструктивное решение, показанное на рис. 2, см. вторую сторону обложки.

Традиционное конструктивное решение полагает преимущество конструкции ГМИС СВЧ и использование всей инфраструктуры изготовления, включая средства измерения параметров, испытания, тренировки и т. д. Именно традиционное конструктивное решение использовано для ГМИС СВЧ на алмазе.

Новое конструктивное решение ГМИС СВЧ позволяет всю пассивную часть, включая пассивные элементы (R , L , C), межсоединения, выводы и кристалл активного элемента, разместить на монолитной алмазной плате из ПАП, а герметизацию осуществить объемной алмазной крышкой из ПАП.

Алмазная плата и объемная алмазная крышка из ПАП позволяют получить самосогласованную в диапазоне температур конструкцию ГМИС СВЧ на алмазе.

Для полного исключения проволочных проводников, присущих традиционным методам сборки, целесообразно использовать в ГМИС СВЧ на алмазе методы беспроволочного монтажа навесных активных компонентов (кристаллов диодов, транзисторов и МИС) на алмазную плату ГМИС СВЧ, а именно следующие методы:

— планарно-монтируемых компонентов (SMD — Surface Mount Device);

— перевернуто-монтируемых компонентов (FMD — Flip chip Mount Device);

— по технологии поверхностного монтажа (SMT — Surface Mounted Technology) полностью исключая проволочные соединения [4–7].

Примеры беспроводного монтажа транзистора на поверхность алмазной платы ГМИС СВЧ показаны на рис. 3, см. третью сторону обложки.

Беспроволочный монтаж позволяет полностью исключить проволочные соединения и сделать конструкцию ГМИС СВЧ на алмазе максимально приближенной к МИС СВЧ.

Массогабаритные характеристики ГМИС СВЧ на алмазе становятся соизмеримыми с МИС СВЧ, а для измерения параметров ГМИС СВЧ используется оборудование, предназначенное для МИС СВЧ.

2. ГМИС СВЧ-SMD для поверхностного монтажа

Для поверхностного монтажа ГМИС СВЧ на алмазе предложена конструкция ГМИС СВЧ-SMD, которая родилась в результате анализа конструкций, материалов, структурных и электрических схем, тестовых плат зарубежных и отечественных МИС СВЧ в корпусе SMD [8–17].

Анализ корпусированных МИС СВЧ показал, что основная масса зарубежных и отечественных МИС СВЧ выполнена в корпусе SMD для поверхностного монтажа на печатную плату. Корпус SMD изготавливают преимущественно из керамики LTCC [18], имеющей малую теплопроводность — около 20 Вт/(м · К), которая позволяет герметизировать только МИС СВЧ с малой рассеиваемой мощностью.

Для тестирования зарубежных и отечественных МИС СВЧ в корпусе SMD используют преимущественно тестовую плату на основе экранированной копланарной линии. Тестирование с помощью тестовой платы предполагает только выборочный контроль МИС СВЧ.

Предложена конструкция ГМИС СВЧ-SMD для поверхностного монтажа с повышенной выходной мощностью, показанная на рис. 4, см. третью сторону обложки [19].

ГМИС СВЧ-SMD состоит из диэлектрического алмазного основания и объемной алмазной крышки из ПАП. На внутренней и внешней сторонах основания расположены контактные площадки и выводы.

Герметизация ГМИС СВЧ-SMD осуществляется посредством крышки объемной формы из ПАП, соединенной с алмазным основанием клеем МС-Н.

Внешние и соответствующие им внутренние металлизированные контактные площадки и выводы соединены между собой электрически крат-

чайшим путем посредством металлизированных отверстий, имеющих высокую электропроводность. При этом:

- внешние и соответствующие им внутренние «земляные» металлизированные контактные площадки расположены в центральной части основания и электрически соединены между собой;

- внешние и соответствующие им внутренние металлизированные выводы расположены по периферии на внешней и внутренней сторонах основания между центральными контактными площадками и периметром;

- внешние и соответствующие им внутренние металлизированные выводы выполнены в виде отрезков копланарной линии (КЛ);

- «заземляющие» выводы КЛ на внешней и внутренней сторонах основания электрически соединены с соответствующими внешними и внутренними «земляными» металлизированными контактными площадками.

На внутреннюю центральную металлизированную контактную площадку установлен кристалл МИС СВЧ, имеющий планарные выводы, расположенные по периферии кристалла. Соединение выводов кристалла с выводами корпуса осуществляется золотой проволокой.

Конструкция ГМИС СВЧ-SMD является самосогласованной в диапазоне температур, так как алмазное основание и объемная алмазная крышка изготовлены из одинакового материала.

3. Исследование потерь в МПЛ и КЛЭ на алмазе

В конструкции ГМИС СВЧ на алмазе все пассивные элементы схемы ГМИС размещены на одной алмазной плате, изготовленной из ПАП толщиной порядка 100 мкм. Априорная информация о параметрах ПАП оказалась недостаточной, поэтому потребовались дополнительные исследования и измерение потерь в микрополосковых линиях (МПЛ) и экранированных копланарных линиях (КЛЭ) с заземляющей металлизацией обратной стороны подложки. Теоретические расчеты потерь в линиях проводили с помощью программы ADS. Потери в МПЛ и КЛЭ на алмазных платах толщиной порядка 100 мкм сравнивали с аналогичными потерями в МПЛ на плате из арсенида галлия толщиной 100 мкм. Структура подложек, на которых проводили расчеты, показана на рис. 5.

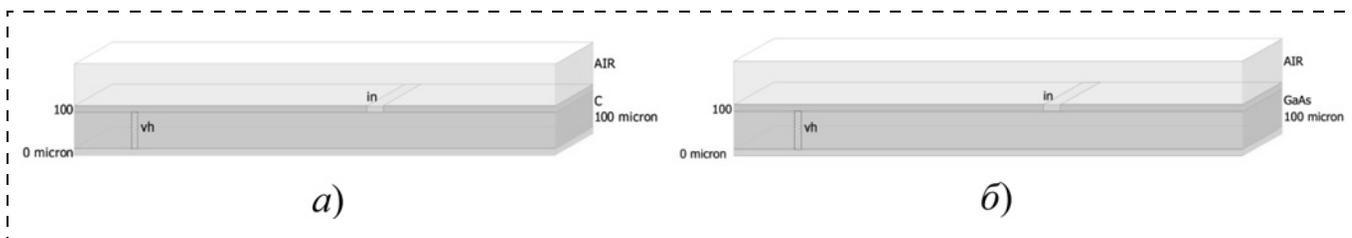


Рис. 5. Алмазная плата из ПАП толщиной 100 мкм (а), плата арсенида галлия толщиной 100 мкм (б)

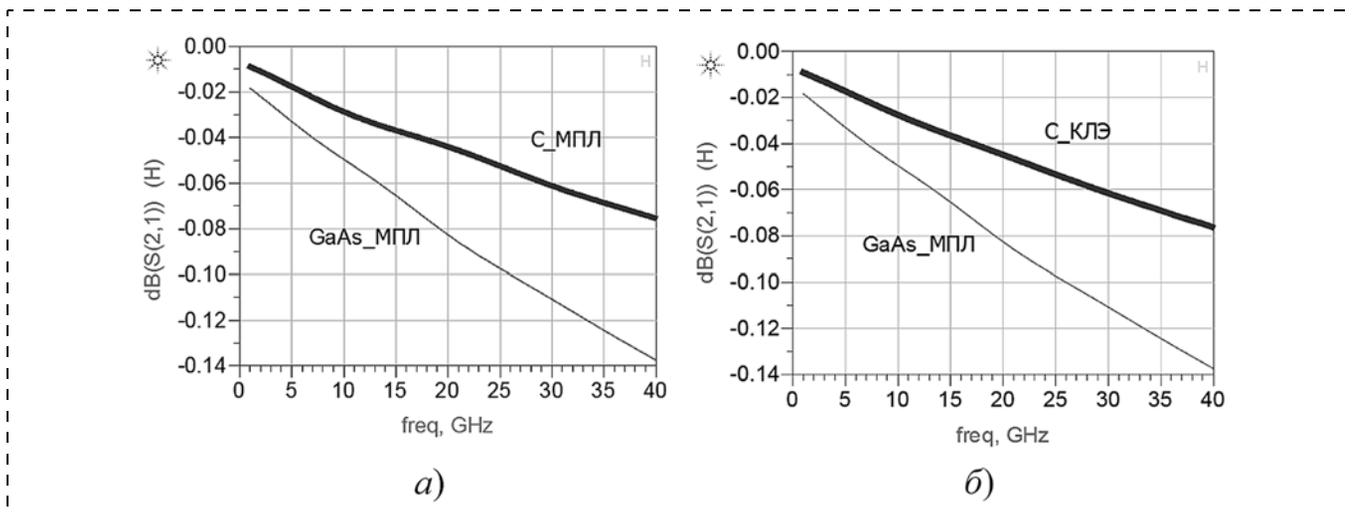


Рис. 6. Теоретические потери в линиях (50 Ом) длиной 1 мм, на платах толщиной 100 мкм: а — МПЛ на алмазе С и арсениде галлия GaAs; б — КЛЭ на алмазе С и МПЛ на арсениде галлия GaAs

Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

Теоретически рассчитанные значения потерь в линиях с волновым сопротивлением 50 Ом, изготовленных на платах толщиной 100 мкм и длиной 1 мм, в МПЛ на арсениде галлия и в МПЛ и КЛ на алмазе представлены в виде графиков, приведенных на рис. 6.

В диапазоне частот до 40 ГГц теоретически рассчитанные потери в МПЛ и КЛЭ на алмазе меньше, чем потери в МПЛ на GaAs. Это связано с меньшей диэлектрической проницаемостью алмаза и, соответственно, большей шириной линии. Для измерения потерь изготовлены отрезки МПЛ и КЛЭ длиной 1, 2 и 3,8 мм на алмазных платах из ПАП размерами $3,8 \times 2,8 \times 0,1$ мм. При этом линии и контактные площадки расположены на лицевой стороне платы, на обратной стороне платы — заземляющая металлизация, а в объеме платы — металлизированные отверстия.

Внешний вид изготовленных отрезков МПЛ и КЛЭ на алмазной плате из ПАП показан на рис. 7.

Результаты измерения удельных потерь в сравнении с расчетными потерями в МПЛ на плате из арсенида галлия толщиной 100 мкм (на 1 мм длины линии) показаны на рис. 8.

Таблица 1

Материал подложки	Относительная диэлектрическая проницаемость	Тангенс диэлектрических потерь	Теплопроводность, Вт/(м · К)
Лейкосапфир	9,6	0,0002	40
Арсенид галлия GaAs	12,9	0,006	46
Карбид кремния 4H-SiC	9,66	0,003	490
Алмаз С	5,7	0,006	1000
Материал слоя металлизации	Толщина, мкм	Проводимость, См/м	Теплопроводность, Вт/(м · К)
Золото (in)	3	29 000 000	320
Золото (vh)	3	29 000 000	320
Медь	—	—	406

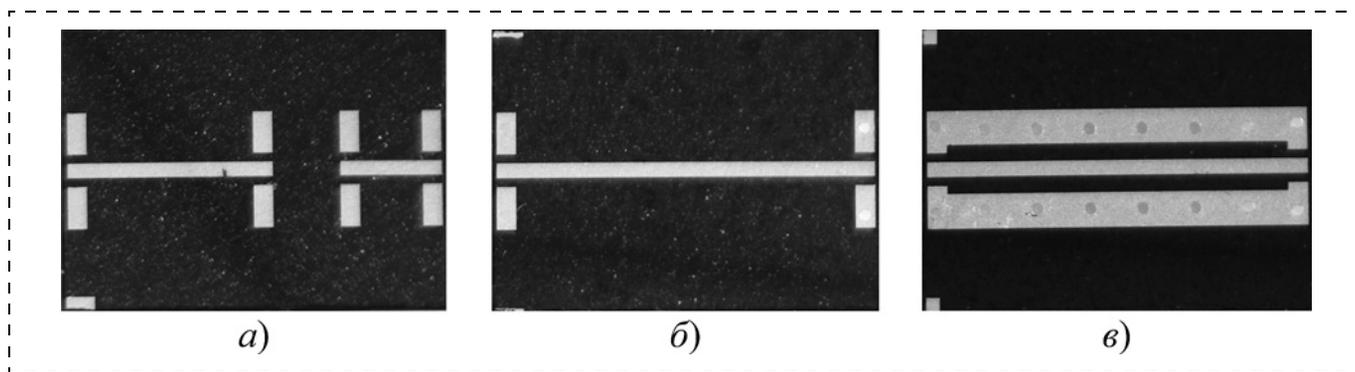


Рис. 7. Отрезки МПЛ длиной 1 мм и 2 мм соответственно (а), отрезок МПЛ линии длиной 3,8 мм (б), отрезок КЛЭ линии длиной 3,8 мм (в)

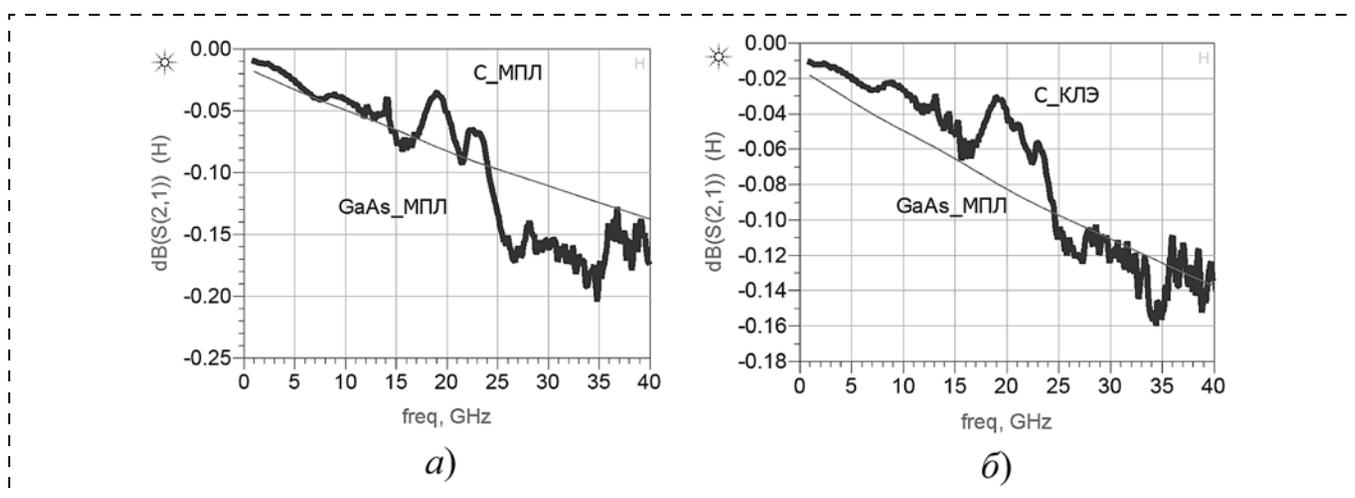


Рис. 8. Измеренные потери:

а — потери в МПЛ на алмазе и GaAs; б — потери в КЛЭ на алмазе и МПЛ на GaAs

Потери в линиях измеряли с помощью векторного анализатора цепей № 5244А (фирмы *Keysight*), оснащенного зондовой станцией с копланарными зондами (фирмы *Cascade Microtech*).

Потери оценивали по параметру S_{21} и сравнивали с расчетными потерями в МПЛ на плате арсенида галлия.

Исследование показало, что в диапазоне до 40 ГГц измеренные потери в МПЛ и КЛЭ на алмазных платах из ПАП сравнимы с расчетными потерями в МПЛ на плате арсенида галлия.

Таким образом, теоретически рассчитанные и измеренные потери в МПЛ и КЛЭ на алмазе сравнимы с потерями в МПЛ на арсениде галлия.

ГМИС СВЧ на алмазе позволяют использовать оба типа линий МПЛ и КЛЭ.

Теоретически рассчитанные значения КСВН и потерь в КЛЭ и МПЛ на алмазе при длине линии 1 мм и различной толщине алмазной подложки из ПАП показаны на рис. 9.

Согласованный режим соответствует МПЛ и КЛЭ с толщиной алмазной подложки 100 мкм.

При изменении толщины алмазной подложки от 100 до 150 мкм увеличиваются КСВН и потери в обоих типах линий, однако увеличение КСВН и потерь значительно меньше для КЛЭ.

Таким образом, в ГМИС СВЧ на алмазе можно использовать оба типа линий — МПЛ и КЛЭ, однако при использовании некалиброванных алмазных подложек из ПАП толщиной от 100 до 150 мкм КЛЭ оказывается более предпочтительной по сравнению с МПЛ.

4. Пассивные элементы ГМИС СВЧ на алмазе

ГМИС СВЧ на алмазе предназначены в первую очередь для создания предварительных и выходных усилителей мощности (ПУМ, ВУМ),

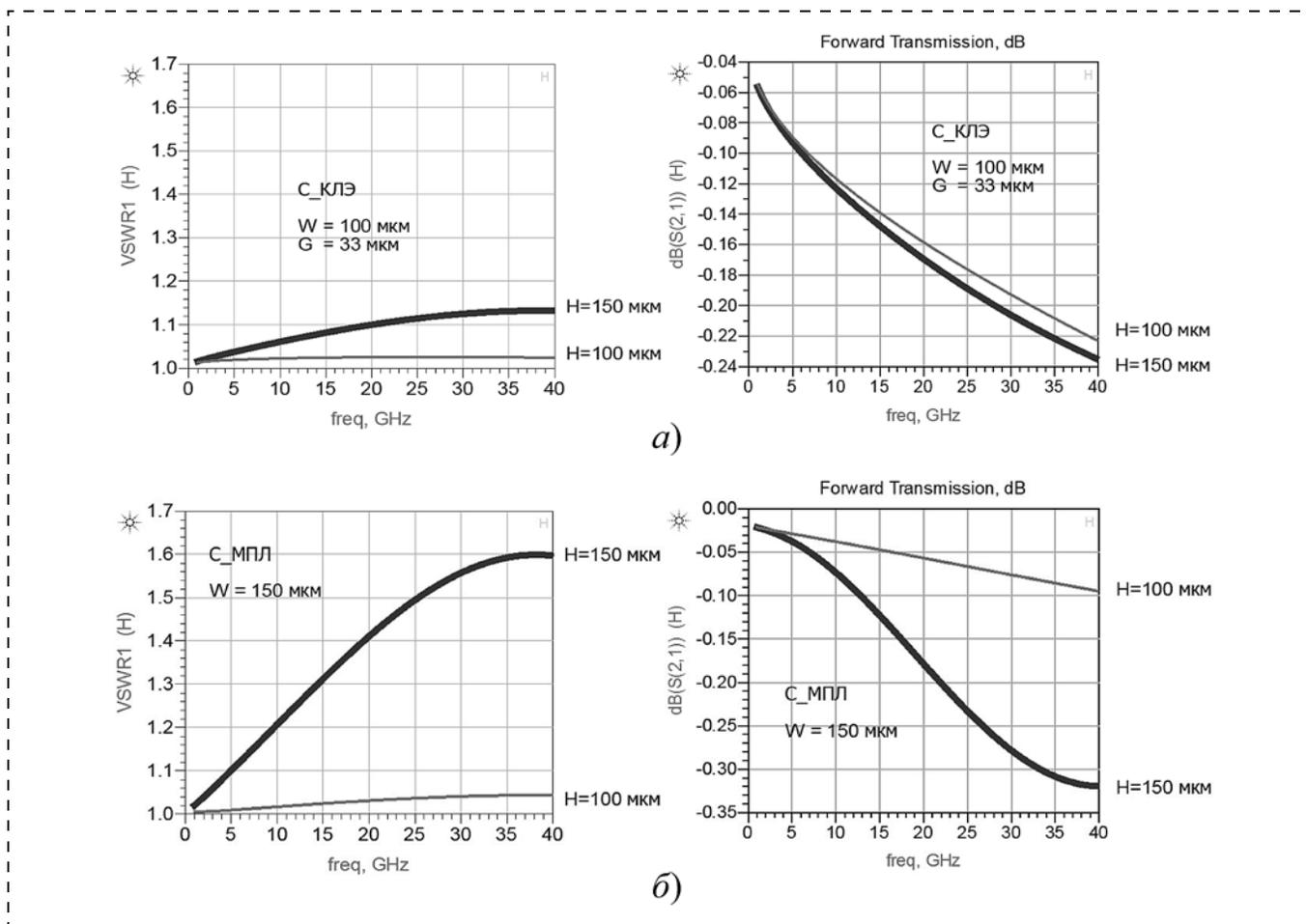


Рис. 9. При изменении толщины алмазной подложки из ПАП: КСВН и потери в КЛЭ (а) и МПЛ (б)

которые работают при повышенных напряжениях питания и токах.

Основными пассивными элементами ГМИС СВЧ на алмазе являются резистивные, индуктивные и емкостные (R , L , C) элементы, МПЛ и КЛЭ, выводы. При выборе их конструкции использован опыт создания ГИС и ГМИС СВЧ.

Резистивные элементы изготавливают из тантала с удельным поверхностным сопротивлением 50...100 Ом/кв. При этом тантал обязательно защищается слоем диэлектрика, препятствующим его взаимодействию с кислородом воздуха.

Индуктивные элементы — межсоединения и выводы изготавливают из меди, обеспечивающей повышенную на порядок, по сравнению с алюминием, удельную плотность тока, и более устойчивой к электромиграции.

Емкостные элементы — МДМ-конденсаторы (разделительные, блокировочные и согласующие) имеют конструкцию плоского двухобкладочного конденсатора с одним диэлектрическим слоем.

Емкость МДМ-конденсатора прямо пропорциональна площади одной обкладки конденсатора и относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика и обратно пропорциональна расстоянию между обкладками конденсатора. Пробивное напряжение между обкладками конденсатора определяется электрической прочностью диэлектрика, при этом, чем меньше расстояние между обкладками, тем меньше пробивное напряжение конденсатора. При создании конденсаторов возникают противоречия:

- с одной стороны, разделительные и блокировочные конденсаторы требуют большую удельную емкость, чтобы обеспечить малую занимаемую площадь ГМИС СВЧ;

- с другой стороны, согласующие конденсаторы требуют малую удельную емкость, чтобы обеспечить геометрическую реализуемость обкладок конденсаторов и точную настройку схемы на заданную частоту;

- с третьей стороны, ГМИС СВЧ на алмазе предназначены для работы при повышенных на-

пряжения питания и требуют конденсаторов с повышенным пробивным напряжением, что вызывает увеличение толщины диэлектрического слоя и неминуемо приводит к уменьшению емкости конденсатора.

Для преодоления этих противоречий в зарубежных конструкциях МИС СВЧ миллиметрового диапазона длин волн используют многослойные 3D-конструкции конденсаторов [20–23].

Исследована возможность создания многослойного 3D-конденсатора на многослойных диэлектриках, содержащих несколько слоев диэлектрика Si₃N₄ и один слой SiO₂, и создан четырехобкладочный конденсатор, конструкция которого приведена на рис. 10, см. третью сторону обложки.

В многослойной 3D-конструкции МДМ-конденсатора для увеличения емкости двухобкладочные МДМ-конденсаторы соединяют параллельно, при этом емкость четырехобкладочного МДМ-конденсатора в 3 раза больше, чем у двухобкладочного МДМ-конденсатора.

В многослойной 3D-конструкции МДМ-конденсатора для уменьшения емкости двухобкладочные МДМ-конденсаторы соединяют последовательно, и, соответственно, емкость четырехоб-

кладочного МДМ-конденсатора в 3 раза меньше, чем емкость двухобкладочного МДМ-конденсатора.

5. Технология изготовления ГМИС на алмазе

Стержневыми задачами при поиске нового технологического решения для ГМИС СВЧ оказались выбор материала диэлектрической подложки с высокой теплопроводностью и разработка технологического процесса изготовления металлизированных отверстий в подложке.

Обоснование выбора подложки для ГМИС СВЧ. Параметры известных подложечных материалов приведены в табл. 2.

Анализ известных подложечных материалов показывает, что ни один из них не может одновременно удовлетворить всем требованиям, которые предъявляются к диэлектрическим платам для ГМИС СВЧ. При этом только три материала (карбид кремния, графен и алмаз) имеют теплопроводность, необходимую для создания ГМИС СВЧ повышенной выходной мощности.

Подложки из карбида кремния. Карбид кремния (SiC) со своими уникальными характерис-

Таблица 2

Материал	Ширина запрещенной зоны, эВ	Напряжение пробоя, МВ/см	Подвижность, см ² /(В·с)		Теплопроводность, Вт/(м·К)	Постоянная решетка, нм	ТКЛР, ×10 ⁻⁶ К ⁻¹	Цена, руб./см ²
			электронов	дырок				
RO4350B					0,62		11	
LTCC					20		7	
SiO ₂		1			0,1		4	
Si ₃ N ₄		1			30		5	
Ge	0,66	0,2	3900	1900	28	0,357	5,9	
Si	1,12	0,4	1500	540	150	0,357	5	150
GaAs	1,42	0,4	8500	400	46	a = 0,565	6,4	300
Сапфир					40		5	300
GaN	3,0	3	1250	850	130	a = 0,319 b = 0,519	5,9	
Карбид кремния (4H-SiC)	3,26	3	800	70	490	a = 0,3 c = 1	4,0	5000
Алмаз (CVD)	5,45	10	2200	1600	2000	0,357	1,1	2000
Графен					5000	0,246		
Медь					406		16,6	
Молибден					150,0		5,3	
МД-50					271		10,9	

тиками используется в качестве подложки для создания высокочастотных, высокоомощных и высокотемпературных электронных приборов — полевых СВЧ транзисторов на гетероструктурах AlGaN/GaN/SiC (GaN ПТШ). Подложки из SiC в настоящее время очень дорогие, их производит фирма *Cree*, США [24].

Cree — мировой лидер в области разработки и производства технологий и материалов на основе SiC поставляет на мировой рынок пластины монокристаллического SiC, а также эпитаксиальные и гетероэпитаксиальные структуры нитрида галлия на подложках SiC диаметром 2, 3 и 4 дюйма.

В настоящее время начали разработки пластин монокристаллического SiC Япония, Китай и европейские фирмы.

В условиях санкций против России высокая стоимость монокристаллических подложек SiC и гетероструктур GaN на SiC, трудности их приобретения в необходимых для разработки и тем более для производства количествах сдерживает работы отечественных разработчиков.

В России ведутся разработки подложек монокристаллического SiC и эпитаксиальных, и гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия на подложках SiC.

Подложки из графена. Графен (Gr) — двумерная аллотропная модификация углерода, образованная слоем атомов углерода толщиной в один атом. Благодаря очень высокой электропроводности и прочности графен обещает стать ключевым материалом в полупроводниковой промышленности [25, 26]. Подвижность электронов в графеновых структурах в 100 раз превышает их подвижность в кремнии. Несмотря на большое число публикаций, в настоящее время материал графен находится на стадии исследований и в России не выпускается.

Подложки из алмаза. Алмаз (C) — «несокрушимый», самый твердый минерал и при нормальных условиях метастабилен и может существовать неограниченно долго. Алмаз имеет теплопроводность при комнатной температуре выше любого другого объемного материала (кроме графена). Температура плавления алмаза 3700...4000 °C при давлении 11 ГПа. На воздухе алмаз сгорает при температуре 850...1000 °C, а в струе чистого кислорода горит слабо-голубым пламенем при 720...800 °C, полностью превращаясь, в конечном счете, в углекислый газ. В вакууме или в инертном газе алмаз при повышенных температурах постепенно переходит

в графит, а при нагреве до 2000 °C без доступа воздуха спонтанно за 15...30 мин переходит в графит и взрывообразно разрушается на мелкие части.

Алмаз является единственным диэлектрическим подложечным материалом с высокой теплопроводностью, который в настоящее время разрабатывают и изготавливают в России. В настоящее время производят подложки из естественного алмаза и искусственного монокристаллического алмаза [27, 28]. Однако подложки монокристаллического алмаза имеют малые размеры не более 3 × 3 мм и не пригодны для группового изготовления плат ГМИС СВЧ.

Основой современной алмазной электроники стал искусственный поликристаллический алмаз, а именно поликристаллическая алмазная пленка (ПАП), получаемая из газовой фазы водорода и метана методом CVD в СВЧ плазме [29—31].

В настоящее время методом CVD получают чистые поликристаллические алмазные пленки — ПАП толщиной 1...3000 мкм на жертвенной пластине кремния диаметром до 100 мм.

Алмазная электроника на основе ПАП уже используется для создания прочных покрытий на режущих инструментах, шестерен сверхточных механизмов, алмазных теплоотводов, конструктивных компонентов и алмазных подложек.

Технология CVD алмаза стала самой популярной благодаря максимально высокой чистоте синтезируемой пленки, гибкости в выборе режимов роста, скорости роста, малым затратам времени на обслуживание установки. При этом получают пластины поликристаллического алмаза высокого качества [32].

В настоящее время многие зарубежные фирмы и отечественные организации выращивают ПАП, а в России этим занимаются такие организации, как ИОФ РАН, ООО «ТВИНН» (г. Москва) и др.

Сравнительный внешний вид ПАП зарубежного и отечественного производства показан на рис. 11.

ПАП изготавливают в виде квадратов и круглых пластин диаметром 2...4 дюйма.

Сравнительные параметры поликристаллических пластин алмаза и пластин монокристаллического сапфира приведены в табл. 3.

Алмаз имеет высокую теплопроводность, меньшую относительную диэлектрическую проницаемость и высокое критическое поле пробоя по сравнению с сапфиром и карбидом кремния. Поэтому базовым материалом для изготовления

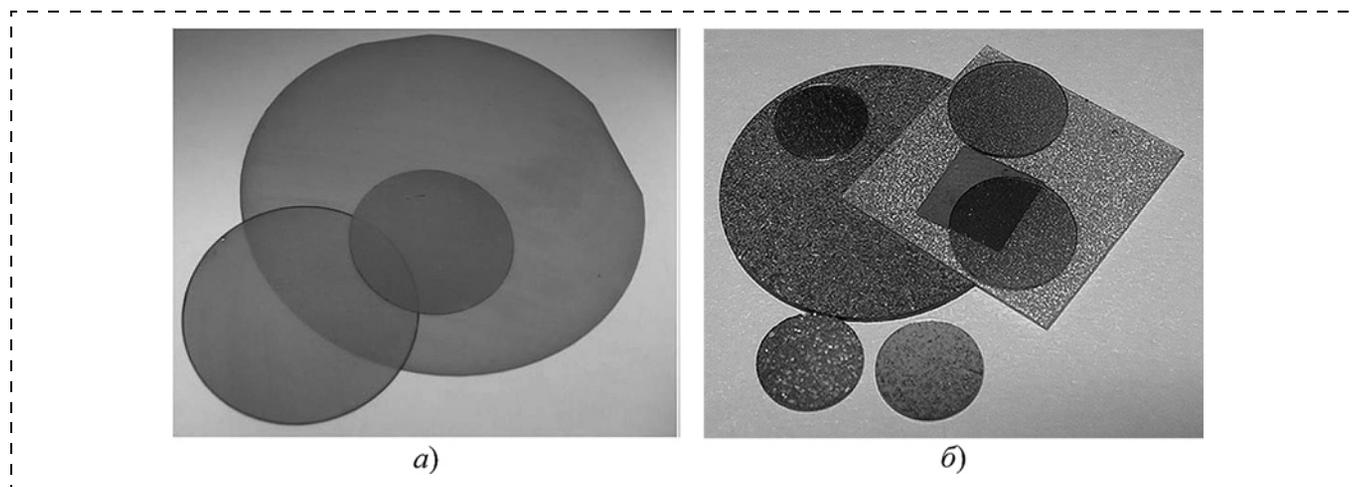


Рис. 11. Поликристаллические алмазные пленки — ПАП: а — зарубежные; б — отечественные (ООО «ТВИНН»)

ГМИС СВЧ выбраны отечественные диэлектрические подложки из ПАП, выращиваемые методом CVD.

5.1. Исследование параметров алмазных подложек из ПАП

В настоящее время предприятие АО «НПП «Исток» им. Шокина» является активным участником выполнения программы импортозамещения и ведет разработки по созданию маломощных и мощных МИС СВЧ диапазона до 40 ГГц.

В обеспечение работ АО «НПП «Исток им. Шокина» в 2016 г. с организациями ИОФ РАН

и ООО «ТВИНН» заключены договоры на выполнение опытно-конструкторских работ по разработке диэлектрических поликристаллических алмазных пленок.

В рамках договора организации выращивают ПАП методом CVD на поверхности полированных подложек жертвенного монокристаллического кремния в виде гетеропластины ПАП-Si диаметром 50 и 57 мм и поставляют их в АО «НПП «Исток им. Шокина».

Автором были проведены предварительные исследования опытных образцов ПАП, изготавливаемых ИОФ РАН и ООО «ТВИНН» с помощью измерительной аппаратуры, имеющейся в этих организациях и в АО «НПП «Исток им. Шокина».

Исследование чистоты поверхности ПАП. ПАП выращивают на полированной стороне жертвенной пластины монокристаллического кремния, имеющего 14 класс чистоты поверхности (соответствующий шероховатости $Ra = 10$ нм, $Rz = 50$ нм). Исследование зародышевой и ростовой поверхности поставляемых ПАП толщиной 100 мкм проводили с помощью растрового электронного микроскопа Leo 2515.

Результаты исследования показали, что на зародышевой стороне явно видны центры нуклеации, которые образуются после процедуры засева поверхности подложки кремния наночастицами алмаза (зародышами). Именно по центрам нуклеации — наночастицам алмаза (зародышам) идет рост алмазной пленки. Видно, что пленка алмаза не сплошная, а имеет явную пятнистость с размерами пятен 200...1000 нм. При этом на поверхности между пятнами видны щели шири-

Таблица 3

Параметр	Алмаз	Сапфир
Тип кристаллической структуры	Кубическая	Гексагональная
Диэлектрическая проницаемость, ед.	$5,7 \pm 0,2$	9,4...11,6
Ширина запрещенной зоны, эВ	5,45	9,5
Тангенс угла диэлектрических потерь, $\times 10^{-6}$	10...100	200
Удельное сопротивление, Ом·см	$10^{13}...10^{16}$	10^{16}
Теплопроводность, Вт/(м·К)	2200	40
Температурный коэффициент линейного расширения $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	1,0	5,8
Плотность, г/см ³	3,45	3,98
Прочность на растяжение, МПа	400...800	420
Радиационная стойкость, нейтрон/см ²	10^{14}	$7 \cdot 10^{15}$
Подвижность электрона/дырки, см ² /(В·с)	2200/1600	—
Критическое поле пробоя, В/см	10^7	$4 \cdot 10^5$
Биологическая совместимость	Совместим	Совместим

ной до 200 нм и глубиной около 200 нм. Роста-вая сторона ПАП имеет ярко выраженную шероховатость за счет хаотично растущих кристаллов. Значение шероховатости определяется толщиной ПАП, и чем больше толщина, тем больше шероховатость ее обратной стороны.

Исследование шероховатости поверхности ПАП. Шероховатость поверхности ПАП толщиной порядка 100 мкм измеряли с помощью профилометра Dektak 150. Шероховатость зародышевой стороны ПАП без обработки достигает $Ra = 20$ нм, $Rz = 70$ нм, что соответствует 12 классу чистоты поверхности. Шероховатость ростовой стороны ПАП без обработки достигает $Ra = 2$ мкм, $Rz = 10$ мкм, что соответствует 6 классу чистоты поверхности.

Исследование поверхностного и объемного сопротивлений ПАП. Измерение поверхностного и объемного сопротивлений ПАП проводили методом последовательного вольтметра.

Измерения показали, что сопротивление ПАП больше 10^9 Ом · см.

Исследование теплопроводности ПАП. Измерение коэффициента теплопроводности (Вт/(м · К)) проводили ИОФ РАН на тестовых образцах ПАП, изготовленных АО «НПП «Исток им. Шокина». Тестовые образцы изготавливали на кусках ПАП площадью 10×10 мм и толщиной 50...250 мкм. Теплопроводность ПАП оценивали на образцах различной толщины при комнатной температуре с помощью лазерного флэш-метода. Результаты измерения теплопроводности показали, что практические значения теплопроводности для ПАП толщиной 100...200 мкм составляют 500...1000 Вт/(м · К), точность измерения теплопроводности ПАП с помощью лазерного флэш-метода составляет 30 %.

Согласно зарубежным данным теплопроводность CVD алмаза толщиной 100...200 мкм составляет 1000...1500 Вт/(м · К) [33].

Исследование внешнего вида ПАП. Исследование внешнего вида ПАП-Si проводили путем внешнего осмотра и фотографирования пластины в естественном свете и с подсветкой. Результаты исследования показывают, что пленки ПАП получают очень напряженными вследствие разного теплового коэффициента линейного расширения — ТКЛР ($10^{-6}/K$), который для алмаза равен 1, а для кремния равен 5, и отслаиваются от подложки кремния. Гетеропластина ПАП-Si имеет трещины и после отделения ПАП от жертвенного кремния рассыпается на куски, имеющие значительный прогиб.

5.2. Создание гетеропластин ПАП-Si и отделение ПАП

На основе проведенных предварительных измерений параметров были сформулированы и согласованы требования технического задания на разработку и поставку ПАП-Si с ИОФ РАН и ООО «ТВИНН». В соответствии с техническим заданием гетеропластины ПАП-Si изготавливают в двух вариантах конструктивного исполнения:

— в виде ПАП на подложке кремния диаметром 57 мм, толщиной 3 мм;

— в виде ПАП на подложке монокристаллического кремния с ориентацией (111), поверхностным сопротивлением более 10 000 Ом, диаметром 50 мм, толщиной 0,35 мм.

Параметры разрабатываемых ПАП приведены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что ПАП имеют удовлетворительную шероховатость поверхности, существенный прогиб, большой разброс по толщине ПАП, невысокие поверхностное и объемное сопротивления. При этом ПАП имеют высокую теплопроводность, твердость и прочность, что позволяет изготавливать из ПАП алмазную плату ГМИС СВЧ и устанавливать на нее кристаллы мощных активных компонентов.

В июне 2018 г. ИОФ РАН и ООО «ТВИНН» завершили ОКР по разработке гетеропластин ПАП-Si и выпустили на них технические условия [34, 35].

ИОФ РАН и ООО «ТВИНН» выращивают ПАП с помощью CVD-процесса на поверхности жертвенной пластины монокристаллическо-

Таблица 4

Параметр, единица измерения	Норма	
	не менее	не более
Толщина ПАП, мкм	1	250
Шероховатость зародышевой стороны ПАП, нм		100
Шероховатость ростовой стороны ПАП, мкм		15
Неравномерность толщины ПАП, %		± 15
Прогиб ПАП-Si, мкм (на Si толщиной 3 мм)		10
Прогиб ПАП-Si, мкм (на Si толщиной 0,35 мм)		30
Число трещин на ПАП, шт.		0
Поверхностное сопротивление ПАП-Si, Ом	10^8	
Объемное сопротивление ПАП-Si, Ом · см	10^8	
Теплопроводность ПАП, Вт/(м · К)	1000	

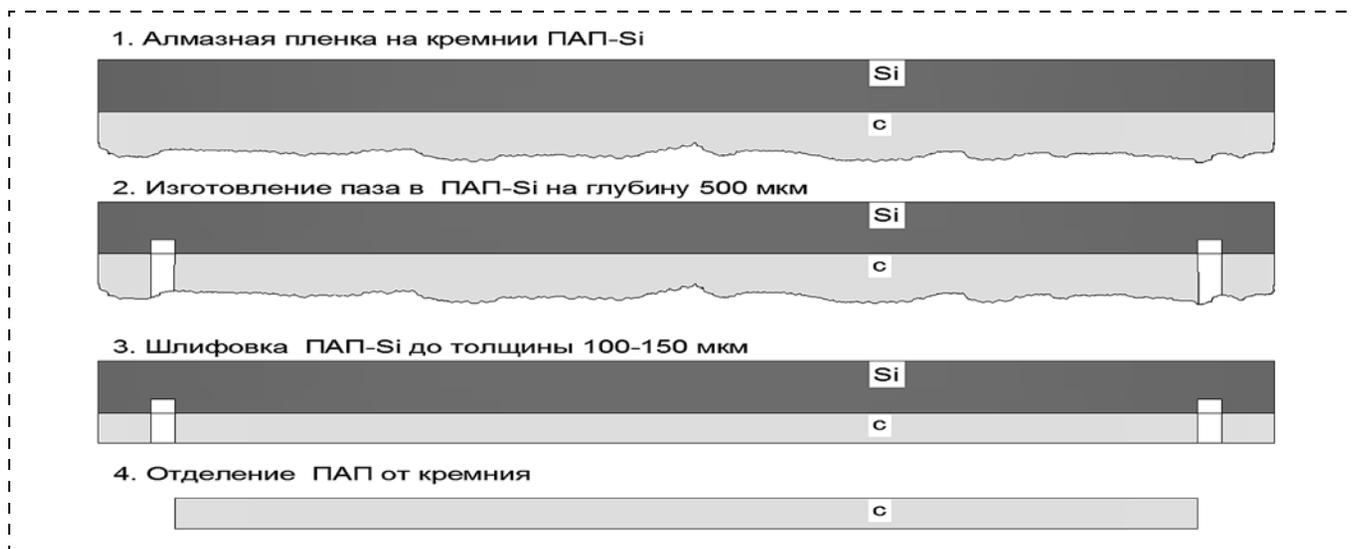


Рис. 12. Гетеропластина ПАП-Si и технологический процесс отделения ПАП от жертвенного кремния

го кремния в виде гетеропластины — ПАП-Si. Исследование показало, что в технологическом процессе ПАП растет как на поверхности, так и по периметру жертвенной подложки кремния, образуя жесткое кольцо. Температура роста ПАП составляет 800...900 °С, поэтому после остывания вследствие разного ТКЛР, который для алмаза равен 1, а для кремния равен 5, ПАП остается очень напряженной.

Если жертвенный кремний химически stráвить, то ПАП ломается на несколько бесформенных кусков, имеющих малую площадь и большой прогиб. Для предотвращения разрушения ПАП, бережного разделения гетеропластины ПАП-Si и отделения целой пластины ПАП необходимо было разорвать связь между ПАП и кольцом. Наиболее простым способом решения этой задачи был метод лазерного фрезерования.

Предложен технологический процесс бережного разделения гетеропластины ПАП-Si и отделения целой пластины ПАП.

Технологический процесс отделения от гетеропластины ПАП-Si целой пластины ПАП показан на рис. 12.

Технологический процесс разделения включает три операции:

1) с помощью лазерного фрезерования с ростовой стороны ПАП-Si делается паз глубиной 500 мкм на расстоянии 1 мм от края пластины;

2) проводится шлифовка ростовой стороны ПАП, которая осуществляется с помощью процесса химико-механической шлифовки [36, 37] и проводится в водородной печи при температу-

ре 1000 °С, при этом ПАП шлифуется и утоняется до толщины 100...150 мкм;

3) проводится химическое травление кремния и отделение целой ПАП.

За счет паза диаметр отделенной пластины ПАП с 50 и 57 мм уменьшается до 48 и 55 мм соответственно.

Этапы практического отделения целой пластины ПАП от ПАП-Si показаны на рис. 13.

Предложенный процесс отделения целой пластины ПАП позволяет отделять ПАП правильной геометрии с малым прогибом, пригодные для группового изготовления ГМИС СВЧ.

Если отделить ПАП без шлифовки, она имеет правильную геометрию, но большой прогиб, и поэтому после шлифовки получают пластины, имеющие неправильную геометрию, уменьшенную площадь и большую неравномерность толщины ПАП.

Процесс термохимической шлифовки необходим для успешного проведения последующих процессов литографии. После термохимической шлифовки и отделения от жертвенного кремния шероховатость ростовой стороны ПАП составляет около 3 мкм, а неравномерность толщины ПАП около 30 %.

Примеры зародышевой стороны отделенных ПАП показаны на рис. 14.

Шероховатость зародышевой стороны отделенных пластин ПАП должна определяться качеством полировки поверхности жертвенного кремния обычно 14 класс (шероховатость 10 нм). Однако реально шероховатость зародышевой стороны ПАП после отделения от жертвенного

кремния имеет большой разброс и не повторяется от пластины к пластине.

Выход годных отделенных ПАП с шероховатостью зародышевой стороны, соответствующей ТУ, составляет порядка 10 %.

Завершившиеся работы организаций ИОФ РАН и ООО «ТВИНН» показали, что для повышения выхода годных необходима разработка процесса прецизионной шлифовки и полировки ПАП.

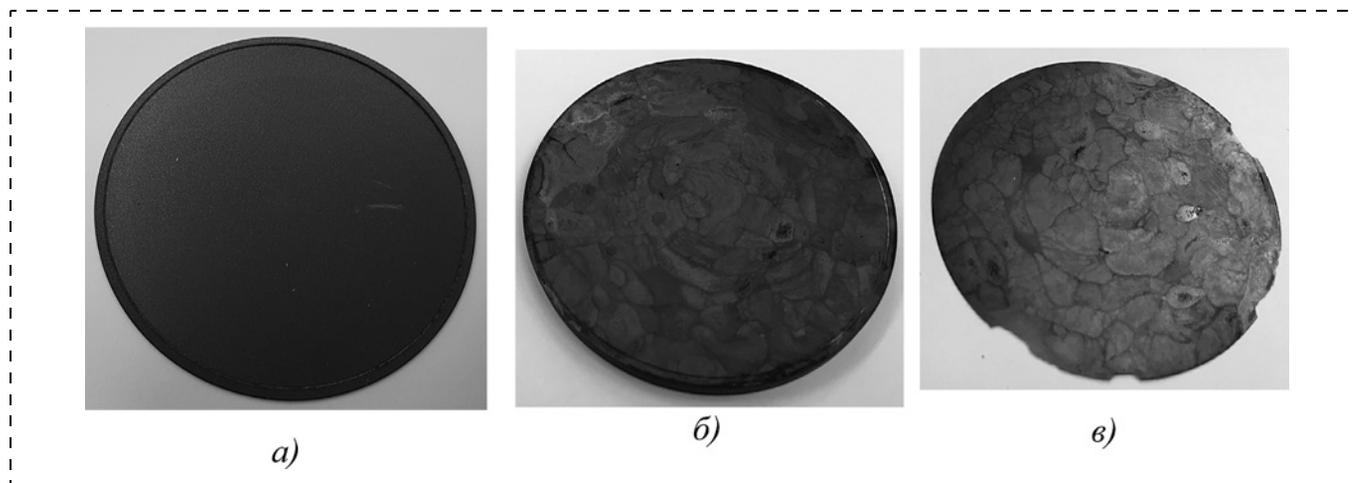


Рис. 13. ПАП-Si паз глубиной 500 мкм с ростовой стороны пластины (а); ПАП-Si с ростовой стороны после шлифовки и утонения (б); ПАП с ростовой стороны после отделения (в)

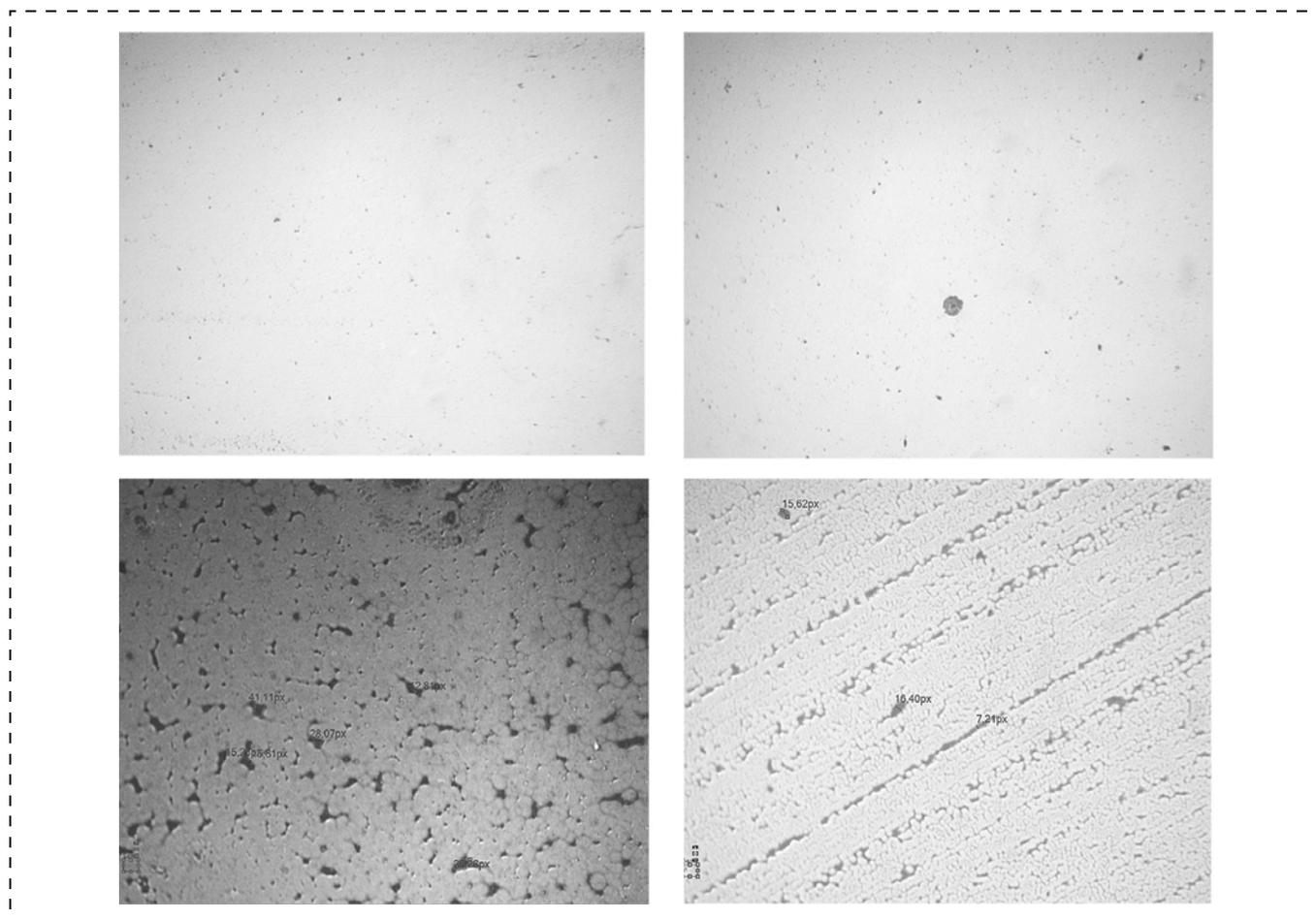


Рис. 14. Зародышевая сторона отделенных пленок ПАП (1 pix = 1 мкм)

5.3. Выбор метода формирования отверстий в ПАП

В базовой технологии изготовления пассивной части ГМИС СВЧ не решен вопрос формирования отверстий в подложке. Известно несколько методов изготовления отверстий в подложке: метод лазерного фрезерования, темплат-метод, метод плазмохимического травления.

Метод лазерного фрезерования применяется для изготовления отверстий в диэлектрических и металлических пластинах. Лазеры видимого света на парах меди имеют великолепные характеристики и обеспечивают апертуру луча лазера порядка 10 мкм. Исследованы отверстия, изготовленные в ПАП с помощью лазера видимого света на парах меди, на установке «Каравелла-2», разработанной и изготавливаемой в АО «НПП «Исток им. Шокина».

Для измерения глубины отверстий диаметром 100 мкм и глубиной до 500 мкм промышленных приборов нет, автор предложил устройство, позволяющее измерять глубину отверстий в пластине толщиной до 500 мкм, с точностью ± 1 мкм.

Результаты исследования отверстий с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) представлены на рис. 15.

Отверстия формировали методом лазерного фрезерования с ростовой стороны пластины. Размеры отверстия с ростовой стороны — 111,9 мкм, а размеры отверстия с зародышевой стороны —

106,7 мкм при заданном диаметре отверстия 100 мкм и толщине ПАП, равной 100 мкм.

Отверстия имеют четкую геометрию и практически вертикальные стенки, скос стенок отверстий — 5 %.

Ростовая сторона ПАП чистая, а на зародышевой стороне вблизи отверстия видны кольца от перегрева пластины лучом лазера. Перегрев пластины в области реза приводит к образованию пленки графита с малым сопротивлением.

Недостатки метода лазерного фрезерования отверстий в ПАП:

- не может быть обеспечена групповая обработка пластин, так как отверстия изготавливают последовательно одно за другим за несколько (до 10) проходов;
- приводит к появлению проводящей пленки графита по линии реза, удалить которую не удается.

Известны способы прецизионной лазерно-плазмохимической резки пластин алмаза [38, 39], которые не приводят к образованию пленки графита по линии реза, но они требуют дорогих установок.

Темплат-метод (*template* — модель, шаблон, матрица) используется практически везде, где необходимо быстрое воспроизведение формы для массового производства изделий [40].

Сделана попытка использовать этот метод для изготовления отверстий в алмазных платах

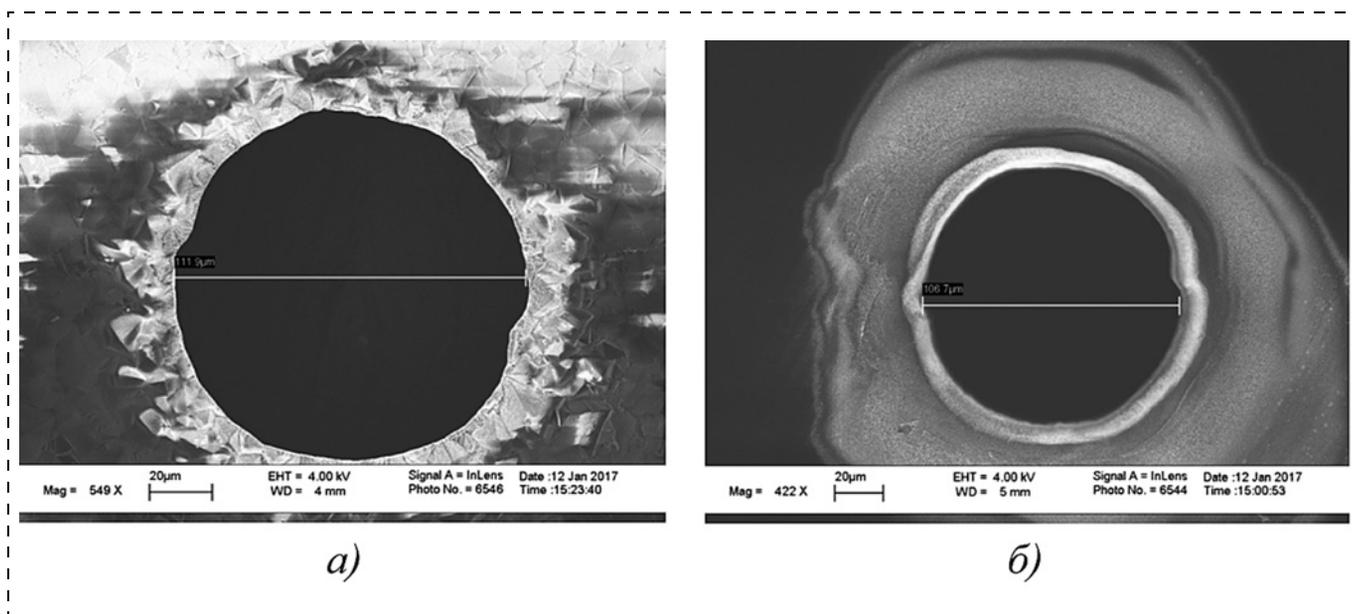


Рис. 15. Отверстия в пластине ПАП:

a — с ростовой стороны; *b* — с зародышевой стороны

ГМИС СВЧ. Для создания темплата (матрицы) использовали полированную пластину кремния толщиной 3 мм, на поверхности которой формировали металлическую маску алюминия для травления отверстий в кремнии. Далее пластину кремния с нанесенной металлической маской помещали в установку плазмохимического травления, где путем глубокого плазмохимического травления в реакторе установки 08-ПХО-100/10-005 в плазме SF_6 на глубину 100 мкм были сформированы отверстия в пластине кремния — темплате (матрице). После изготовления темплата слой алюминия удаляли с поверхности пластины кремния.

На рельефной поверхности темплата выращивали поликристаллическую алмазную пленку толщиной 100 мкм, а после стравливания жертвенной пластины кремния на поверхности ПАП с зародышевой стороны появлялись холмы.

После проведения процесса химико-механической шлифовки холмов на лицевой поверхности ПАП вскрылись отверстия. При этом зародышевая сторона получается шлифованной и требует полировки, а отверстия не имеют четкой геометрии.

Недостатки темплат-метода: низкое качество отверстий; необходимость применения химико-механической шлифовки.

Перспектива темплат-метода — изготовление компонентов объемной формы с 3D-архитектурой.

Метод плазмохимического травления, описанный в ряде работ, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе, используется для травления ПАП. В работе [41] описан способ реактивного ионного травления ПАП в плазме на основе Ag , O_2 , их смесей и SF_6 . При этом с маской алюминия достигнута скорость травления 70 нм/мин. Процесс проводили в установке реактивного ионного травления при мощности ВЧ источника 30 Вт, давлении 5...6 Па и газовом составе плазмы Ag , O_2 , SF_6 в соотношении 1:1:1. Скорость травления низкая, и для травления отверстий в ПАП толщиной 100 мкм требуется 24 ч. Анализ показал, что низкая скорость травления ПАП связана с типом установки, не позволяющей получить высокую интенсивность плазмы.

В настоящее время высокую интенсивность плазмы ($10^{11}...10^{12}$ е/см³) обеспечивают установки реактивного ионного травления с источником индуктивно связанной плазмы (РИТ-ИСП).

Именно реактивное ионное травление используется в зарубежных и отечественных установках для быстрого травления диэлектрических пленок на большую глубину. Метод плазмохимического травления обеспечивает групповое изготовление отверстий в алмазной подложке из ПАП, и именно он выбран базовым методом.

5.4. Плазмохимическое травление отверстий в ПАП

Отсутствие полной априорной информации о скорости травления поликристаллических алмазных пленок — ПАП на установках РИТ-ИСП потребовало проведения исследований и оптимизации технологических режимов травления ПАП. Процесс реактивного ионного травления зависит от множества технологических факторов и решить задачу в аналитическом виде оказалось затруднительно. Поэтому задача решалась с помощью метода математического планирования эксперимента, отыскания экспериментальной зависимости скорости травления ПАП от технологических факторов процесса РИТ-ИСП, т.е. построение математической модели вида:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (1)$$

где y — показатель скорости травления ПАП; x_i — факторы технологического процесса.

Исследование технологического процесса травления ПАП проводили на зарубежной установке РИТ-ИСП — Sorial 200IL, имеющейся в составе пилотной линии АО «НПП «Исток им. Шокина».

Для создания металлической маски на зародышевую поверхность ПАП вакуумным напылением наносили слои титана и алюминия толщиной 0,1 и 4 мкм соответственно, а фотолитографией формировали металлическую маску алюминия.

Для выявления возможностей установки Sorial 200IL по травлению отверстий были сделаны предварительные эксперименты и определена скорость травления отверстий в ПАП в плазме с газовым составом Ag , O_2 , SF_6 . Анализ результатов показал, что скорость травления ПАП зависит от множества факторов. Наибольшая скорость травления ПАП получается при максимальной мощности генератора, наибольшем процентном соотношении O_2 , оптимальном про-

Таблица 5

Фактор	Уровень фактора		
	-1	0	1
x_1 — скорость потока элегаза SF ₆ , см ³ /мин	0,3	0,4	0,5
x_2 — скорость потока кислорода O ₂ , см ³ /мин	40	60	80
x_3 — скорость потока аргона Ar, см ³ /мин	20	35	50

центном соотношении Ar, SF₆ и рабочем давлении в установке.

Максимальная скорость травления 1,3 мкм/мин достигнута при мощности RF, равной 250 Вт. Эта мощность является предельной для установки Corial 200IL.

На основе предварительных экспериментов были выбраны параметр оптимизации и факторы эксперимента и составлен план полного факторного эксперимента для поиска оптимальных параметров технологического процесса травления отверстий в ПАП.

Параметр оптимизации: y — скорость травления отверстий в ПАП.

Факторы технологического процесса:

x_1 — скорость потока элегаза SF₆;

x_2 — скорость потока кислорода O₂;

x_3 — скорость потока аргона Ar;

x_4 — мощность генератора RF = 230 Вт;

x_5 — мощность индуктивно связанной плазмы $P_{\text{исп}} = 1000$ Вт;

x_6 — давление в камере p выбрано равным 10 мТор.

Задачей исследования являлось определение зависимости скорости травления отверстий в ПАП от факторов технологического процесса. Диапазон изменения факторов x_1, x_2, x_3 в планируемом эксперименте был выбран на основе априорной информации о технологическом процессе, практического опыта и возможностей технологической установки Corial 200IL. В связи с отсутствием полной априорной информации о характере исследуемой зависимости скорости травления ПАП автором в целях аппроксимации изучаемой зависимости полиномом первого порядка был составлен план полного факторного эксперимента с учетом парных и тройных взаимодействий. Опыты выполняли однократно, а опыт в центре эксперимента дублировали 3 раза. Результаты измерения параметра — скорости травления пленки ПАП (среднее значение из пяти измерений в различных точках ПАП) приведены в табл. 5, 6.

По полученным данным рассчитаны коэффициенты уравнения для параметра оптимизации y — скорости травления ПАП:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (2)$$

С учетом найденных коэффициентов математическое уравнение, описывающее зависимость скорости травления ПАП от факторов технологического эксперимента, будет иметь вид:

$$y = (1,012 + 0,025x_1 + 0,062x_2 - 0,055x_3 - 0,04x_1x_2 - 0,023x_1x_3 + 0 \cdot x_2x_3 - 0,033x_1x_2x_3). \quad (3)$$

Анализ уравнения показал, что наибольший вклад в увеличение скорости травления ПАП да-

Таблица 6

№ опыта	Факторы эксперимента				Парные взаимодействия				Скорость травления V , мкм/мин
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$	
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,95
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1,06
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1,09
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1,17
5	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1,09
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,97
7	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,82
8	1	1	1	1	1	1	1	1	0,95
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,92

ет кислород. Вклад элегаза в 3 раза меньше, а аргон уменьшает скорость травления ПАП и его необходимо уменьшить до минимума. Уравнение скорости травления отверстий в ПАП при скорости потока элегаза $x_1 = 1$, скорости потока аргона $x_3 = -1$, будет иметь вид:

$$y = 1,1155 + 0,0555x_2. \quad (4)$$

В выбранном диапазоне факторов зависимость скорости травления отверстий в ПАП от содержания кислорода имеет линейный характер и не имеет насыщения. При этом достигнута скорость травления 1,171 мкм/мин с маской из титана алюминия. Оптимальные режимы процесса травления ПАП:

- скорость потока элегаза SF_6 — 0,5 см³/мин;
- скорость потока кислорода O_2 — 80 см³/мин;
- скорость потока аргона Ar — 20 см³/мин.

Технологический процесс плазмохимического травления отверстий в ПАП был выбран базовым процессом [42].

Установка Social 200IL, имеющаяся в составе пилотной линии АО «НПП «Исток им. Шокина», является единственной, поэтому было принято решение о разработке отечественного аналога.

Технические требования и договор на разработку и поставку отечественного аналога согласованы с организацией НИИТМ, г. Зеленоград.

В декабре 2018 г. организация поставила в АО «НПП «Исток им. Шокина» установку РИТ-ИСП «Плазма-ТМ5» для плазмохимического травления ПАП. Сравнение технических параметров установок Social 200IL и «Плазма ТМ5» показало, что технические параметры установки Плазма ТМ5 не уступают параметрам Social 200IL.

Для сравнения зарубежной и отечественной установок были проведены технологические процессы на установке «Плазма ТМ5» и получена скорость травления 1,1 мкм/мин.

Исследована возможность изготовления отверстий в ПАП различной формы: круглой, квадратной и треугольной, в том числе с помощью растрового электронного микроскопа (рис. 16).

Травление отверстий проводили групповым способом с зародышевой стороны ПАП. Круглые отверстия диаметром 100 мкм в ПАП толщиной, равной 100 мкм, имеют четкую геометрию, а отверстия квадратной и треугольной форм имеют скругленные углы, при этом скос вертикальных стенок отверстий составляет около 3 %. Следует отметить, что пластина ПАП после трав-

ления остается чистой как с ростовой, так и с зародышевой стороны.

Для определения возможностей установки «Плазма ТМ5» исследовано травление глубоких (более 300 мкм) отверстий в ПАП. Для этого изготовлена ПАП толщиной 340 мкм, на которой сформирована алюминиевая маска толщиной 8 мкм с отверстиями диаметром 100 мкм. Процесс травления отверстий в ПАП проводили с зародышевой стороны последовательно в несколько этапов. На каждом этапе ПАП помещали в реактор установки «Плазма ТМ5» и травили 30 или 60 мин, после чего ПАП вынимали и измеряли глубину отверстий. Результаты исследования внешнего вида отверстий в пластине ПАП показаны на рис. 17.

Отверстия в пластине ПАП толщиной 340 мкм протравлены насквозь. При этом отверстия в алюминиевой маске имели размеры 200 × 100 мкм и строго прямоугольную форму, а в результате травления ПАП размеры отверстий увеличились и углы округлились. Отверстия с зародышевой стороны ПАП имеют размеры 238 × 149 мкм, а с ростовой стороны — 252 × 164 мкм. При этом увеличение линейных размеров отверстий в ПАП идет неравномерно:

- с зародышевой стороны по широкой стенке — 38 мкм, а по узкой — 49 мкм;
- с ростовой стороны по узкой стенке — 64 мкм, а по широкой — 52 мкм.

Отверстия в ПАП имеют скругленную форму и практически вертикальные стенки, скос стенок отверстий около 4 %.

Результаты исследования зависимости глубины и скорости травления отверстий в пластине ПАП показаны на рис. 18.

Исследованные зависимости глубины H травления отверстий в ПАП от времени травления T и скорости V травления отверстий в ПАП от глубины H отверстий в ПАП носят нелинейный характер. При этом скорость травления уменьшается с увеличением глубины отверстия. Причиной уменьшения скорости V травления отверстий в ПАП является снижение концентрации активных частиц плазмы в отверстии в связи с уменьшением скоростей подачи реагентов и отвода продуктов реакции из отверстий.

Травление отверстий идет в глубину, и одновременно травятся стенки отверстий. Скорость травления стенок отверстий составляет 0,06...0,1 мкм/мин, при этом алюминиевая маска травится со скоростью 10 нм/мин.

Глубина травления отверстий в ПАП приближенно аппроксимируется полиномиальной функцией второго порядка.

$$H = (6,446 + 0,77T - 0,0003T^2), \quad (5)$$

где H — глубина травления отверстий в ПАП, мкм; T — время травления, мин.

Скорость травления отверстий в ПАП приближенно аппроксимируется логарифмической функцией.

$$V = 1,588 - 0,17\ln H, \quad (6)$$

где V — скорость травления отверстий в ПАП, мкм/мин; H — глубина отверстия, мкм.

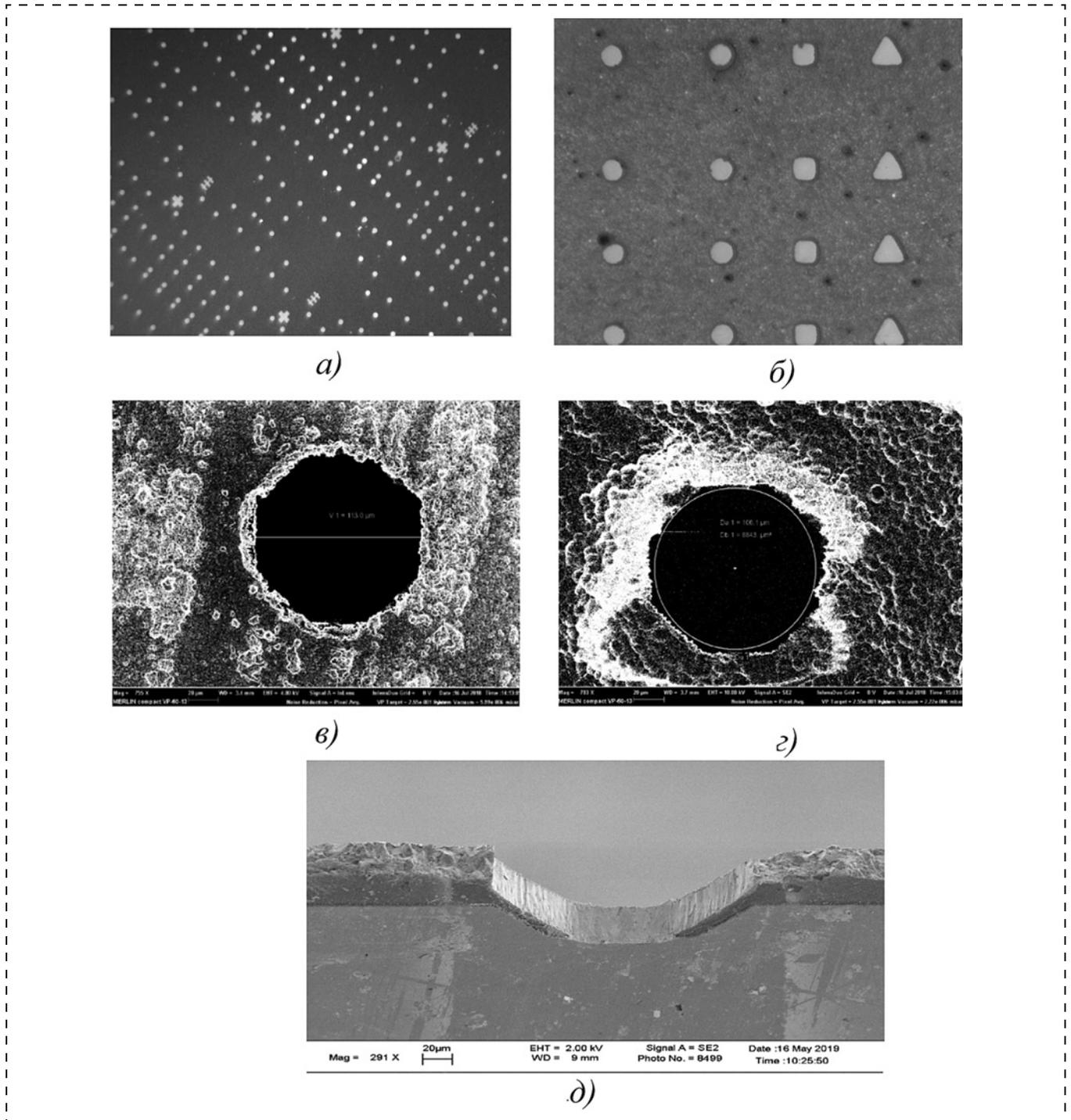


Рис. 16. Пластина с отверстиями в ПАП (а), тестовая пластина (б); зародышевая сторона (в), ростовая сторона (г); отверстие на сколе (д)

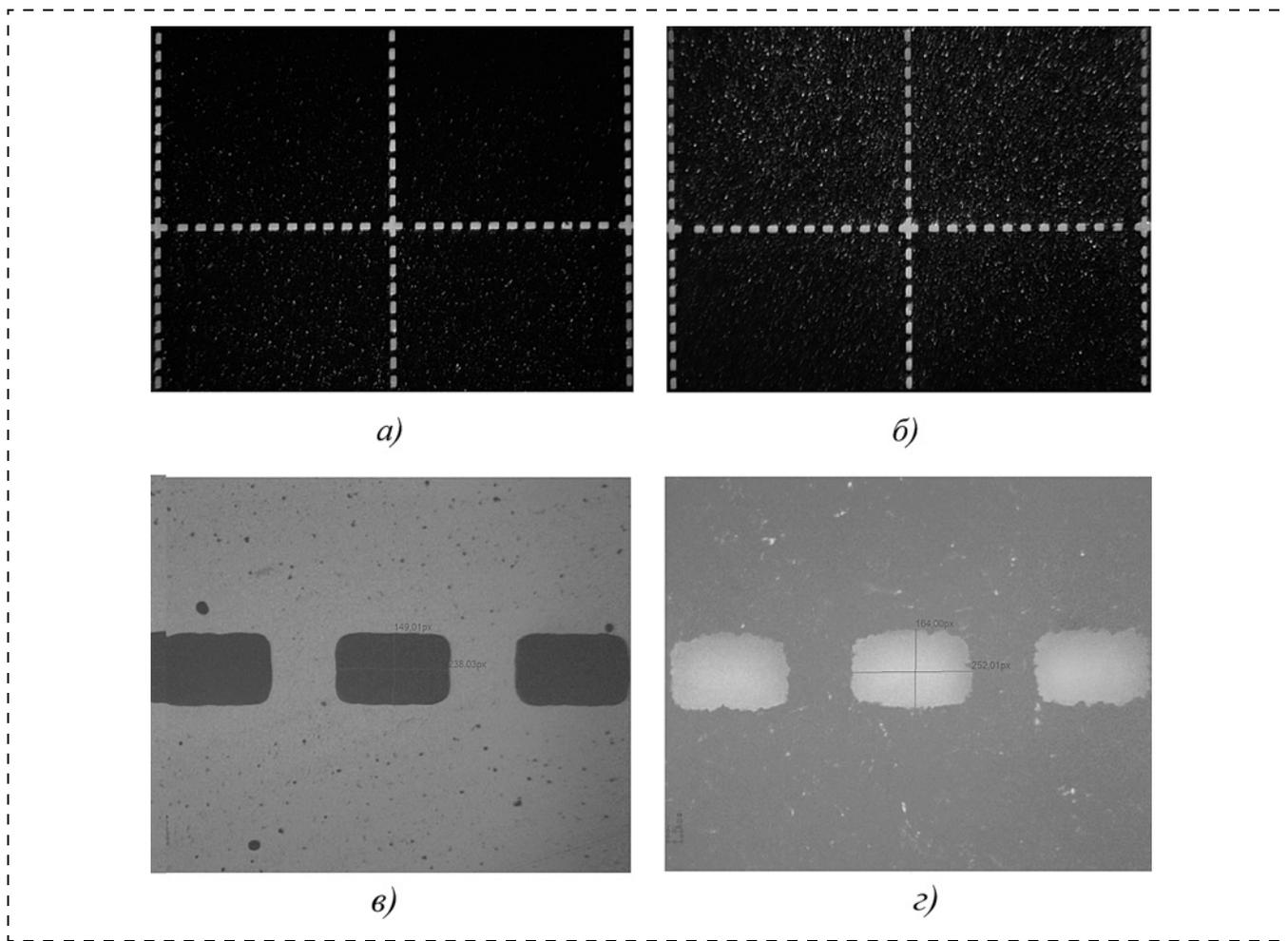


Рис. 17. Внешний вид отверстий в ПАП:

a, в — с зародышевой стороны; *б, г* — с ростовой стороны

Для изготовления плат мощных ГМИС СВЧ используют пластины ПАП толщиной 100...150 мкм, поэтому при скорости травления 1 мкм/мин время травления составит 100...150 мин. Плазмохимическое травление отверстий на установке Плазма ТМ5 выбрано базовым технологическим процессом для группового изготовления отверстий в ПАП.

Технологические процессы травления отверстий в алмазной подложке из ПАП адаптированы с технологическими процессами изготовления ГМИС на пилотной линии АО «НПП «Исток им. Шокина».

Процесс травления отверстий в ПАП происходит пре-

имущественно в среде кислорода, и продуктом реакции является углекислый газ CO_2 . Это экологически чистый процесс, не наносящий вреда окружающей среде.

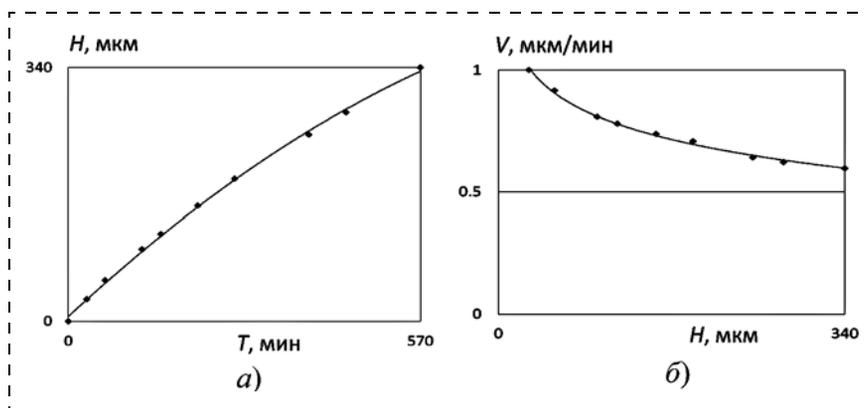


Рис. 18. Зависимость глубины и скорости травления отверстий в ПАП:

a — зависимость глубины отверстий в ПАП от времени их травления; *б* — зависимость скорости травления от глубины отверстий в ПАП

5.5. Металлизация отверстий в ПАП

Для нанесения металлов в отверстия используют процессы термического вакуумного испарения (резистивное, тигельное, электронно-лучевое) и плазменного испарения (катодное и магнетронное) металлических пленок. Для того чтобы отверстие можно было заполнить металлом, оно должно иметь дно. Особенностью отверстий в ПАП являются вертикальные стенки. Для напыления металла на вертикальные стенки необходимы планетарные механизмы. Однако при этом на стенки отверстий осаждается вещества в 4 раза меньше, чем на дно, и в середине глухого отверстия растет холм, кроме того, традиционные установки вакуумного испарения имеют очень малую скорость испарения. Для увеличения скорости испарения вещества используют плазменные установки магнетронного испарения металла, позволяющие осаждать вещество на дно и стенки отверстий со скоростью около 7 мкм/ч, при расстоянии от испарителя до подложки 90 мм. Для повышения скорости испарения в магнетроне создают разряд через пары меди, что позволяет повысить скорость испарения до 2 мкм/мин [43, 44], однако при этом на подложку летят капли меди.

Предложена конструкция установки вакуумного термического испарения, показанная на рис. 19.

Особенность установки — тигельный испаритель большой площади. Испарителем является анод, который подогревается электронами, летящими с катода. Напряжение между испарителем и катодом равно 10 кВ.

Диаметр испарителя приблизительно в 2 раза больше диаметра подложки. Металл осаждается

на дно и стенки отверстия подложки. При этом металл осаждается на дно отверстия практически вертикально, а на стенки отверстия — пропорционально $\cos\theta$.

Автором создана отечественная установка вакуумного напыления слоев хрома и меди из тиглей диаметром 100 мм на алмазные подложки диаметром 50...60 мм. При расстоянии между испарителем и подложкой, равном 150 мм, мощности на испарителе, равной 2,5 кВт, установка позволяет напылять слой меди со скоростью 5...6 мкм/мин. При этом слой меди имеет гладкую поверхность, не содержит капель и за 5 мин напыляется слой меди толщиной 25...30 мкм. Тонкий подслой хрома напыляется сублимацией хрома.

6. Процесс изготовления плат ГМИС СВЧ на ПАП

Технологический процесс изготовления монолитной пассивной части ГМИС на ПАП можно разбить на три основных этапа:

- 1) формирование отверстий в ПАП с зародышевой стороны;
- 2) металлизация отверстий;
- 3) изготовление на зародышевой стороне ПАП всей пассивной части ГМИС.

Технологический процесс изготовления монолитной пассивной части ГМИС на ПАП частично совпадает с базовой технологией изготовления пассивных монолитных сапфировых плат ГМИС СВЧ, а именно: танталовые резисторы, пассивированные слоем диэлектрика; алюминиевая металлизация обкладок МДМ-конденсаторов; прямая литография.

Основные отличия изготовления пассивных монолитных алмазных плат мощных ГМИС СВЧ:

- верхний проводящий слой медный, что связано с большей плотностью тока в проводниках мощных ГМИС СВЧ;
- плазмохимическое изготовление отверстий по групповой планарной технологии и прецизионной литографии.

В настоящее время алмазные подложки имеют малую площадь и ограничивают число алмазных плат ГМИС СВЧ, из-

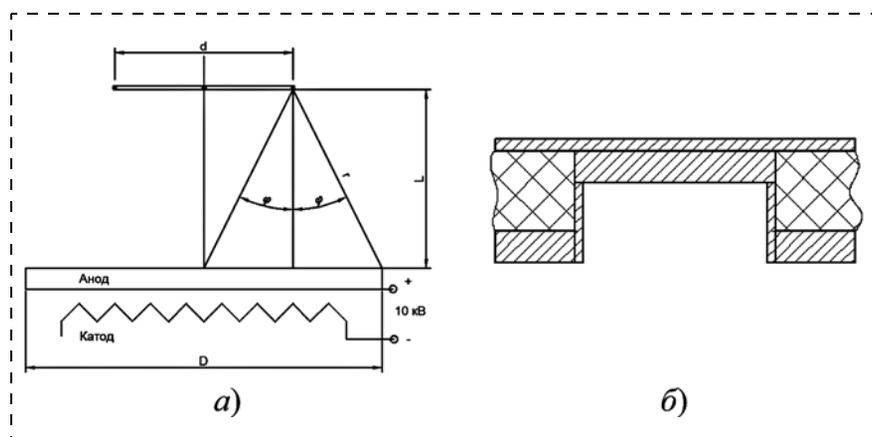


Рис. 19. Конструкция вакуумной установки термического испарения (а) и соответствующие профиль металла на дне и стенках отверстия (б)

готовавливаемых по групповой технологии. На одной ПАП диаметром 50 мм по групповой технологии формируется более 180 плат мощных ГМИС СВЧ размером $3,8 \times 2,8$ мм.

Упрощенный процесс изготовления плат ГМИС СВЧ на ПАП.

Разработан упрощенный технологический процесс изготовления тестовых плат экспериментальных мощных усилительных ГМИС СВЧ на ПАП для измерения S-параметров, коэффициента усиления, выходной мощности, КПД кристалла мощного СВЧ транзистора.

Технологический процесс, являющийся частью базового технологического процесса изготовления алмазных плат ГМИС СВЧ, показан на рис. 20.

Упрощенный технологический процесс изготовления пассивной монолитной алмазной платы ГМИС СВЧ содержит следующие операции.

1. Поверхность алмазной подложки из ПАП очищается.

2. Последовательно вакуумным напылением в одном технологическом процессе наносятся слои Ti, Al толщиной 0,1 и 2 мкм соответственно, затем проводится фотолитография и слои Ti, Al протравливаются насковзь, формируя металлическую маску.

3. Проводится процесс плазмохимического травления ПАП и отверстия протравливаются насковзь.

4. Слои Ti, Al удаляются и поверхность очищается.

5. На обе стороны ПАП вакуумным напылением последовательно наносятся слои Ti, Cu толщиной 0,1 и 5 мкм соответственно, а затем гальванически с обеих сторон осаждается металлизация Ni, Au толщиной 0,5 и 2 мкм соответственно.

6. Проводится фотолитография, которая формирует маску фоторезиста на зародышевой стороне ПАП, через которую слои Ti, Cu, Ni, Au протравливаются насковзь, и формируется верх-

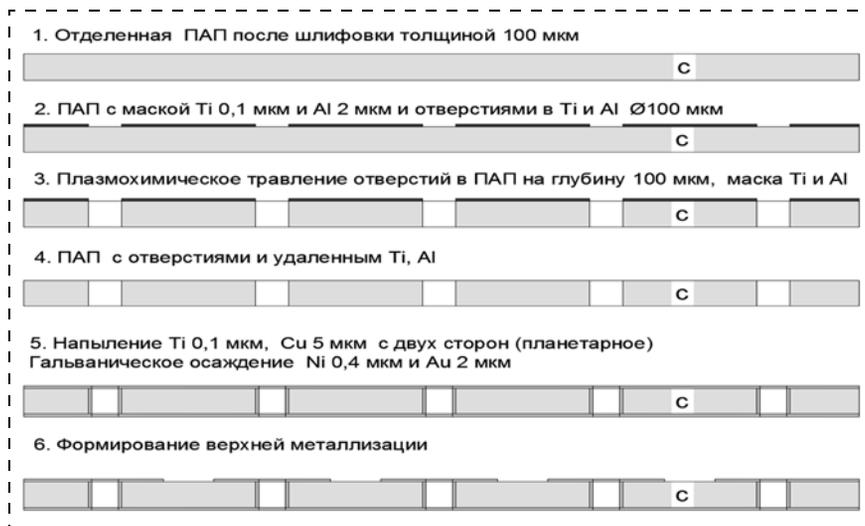


Рис. 20. Упрощенный технологический процесс изготовления монолитной алмазной платы ГМИС

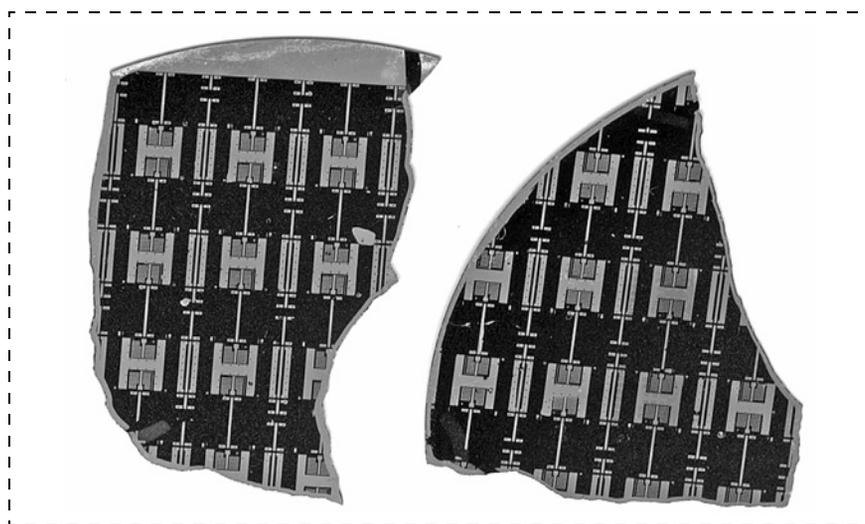


Рис. 21. ПАП с платами для ГМИС СВЧ и отрезками МПЛ и КЛ

няя металлизация. В этом слое изготавливаются индуктивные и емкостные отрезки линий МПЛ и КЛ, спиральные индуктивности, межсоединения и выводы, объединяющие все элементы в единую электрическую схему.

Далее следует операция разделения ПАП на платы ГМИС СВЧ.

Именно этот упрощенный технологический процесс использован для изготовления плат с отрезками линий МПЛ и КЛЭ, платы для измерения СВЧ параметров мощного ПТШ и восстановления его нелинейной модели, а также для создания экспериментальных мощных усилительных ГМИС СВЧ на транзисторах нитрида галлия. Пластины ПАП с платами для ГМИС СВЧ нового поколения и отрезками МПЛ и КЛ линий показаны на рис. 21.

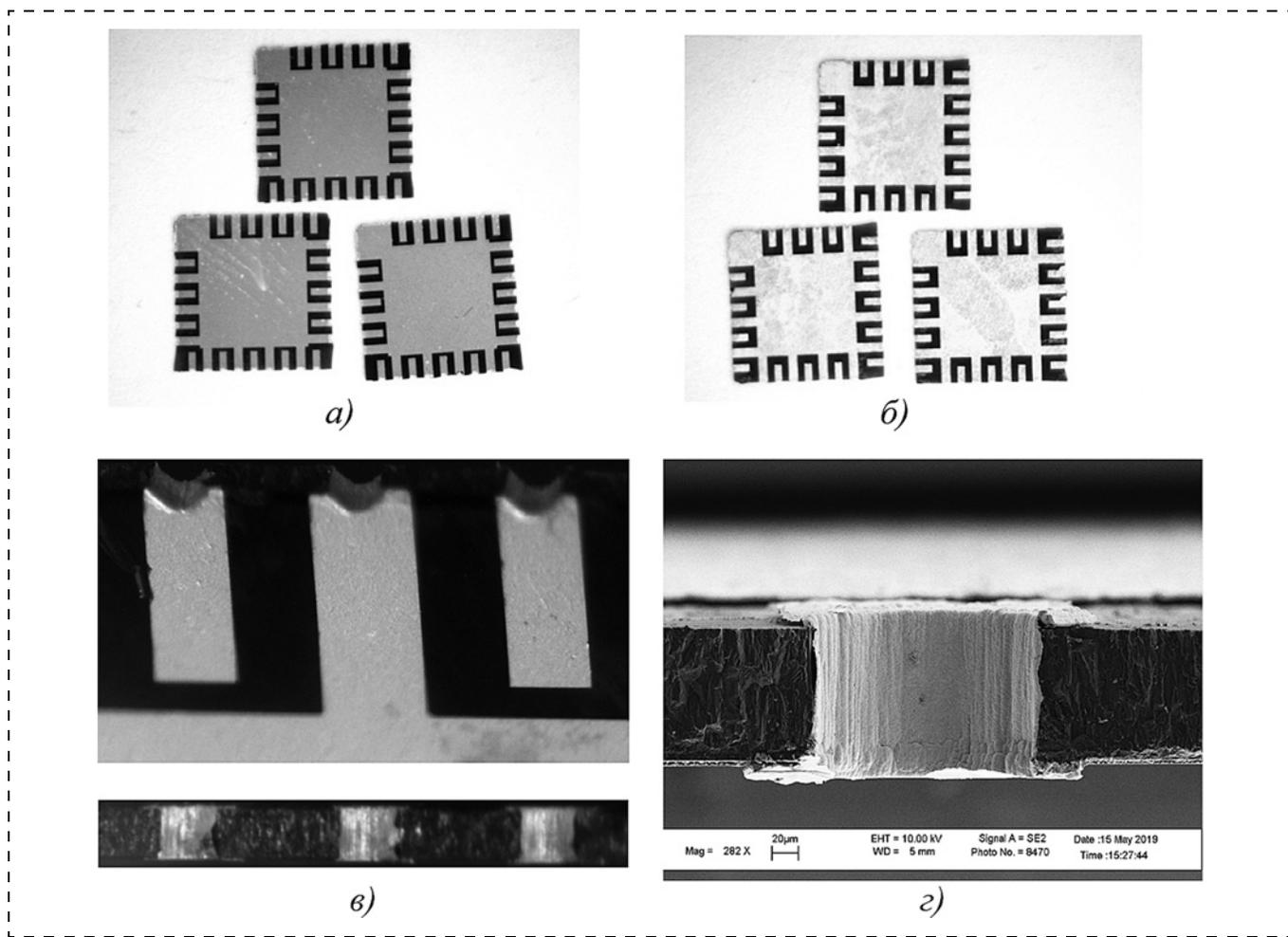


Рис. 22. Основания из ПАП (внутренняя сторона) (а), основания (наружная сторона) (б); фрагмент основания (внутренняя сторона) и на скеле (в); металлизированные отверстия в ПАП после разделения (г)

Процесс изготовления оснований ГМИС СВЧ-SMD. ГМИС СВЧ поверхностного монтажа содержат монолитное алмазное основание и объемную алмазную крышку из ПАП. Для их изготовления потребовалась разработка двух отдельных технологических процессов. Технологический процесс изготовления алмазного основания из ПАП соответствует технологическому процессу изготовления монолитной алмазной платы ГМИС СВЧ с **локальной** металлизацией на ростовой стороне. Основания ГМИС СВЧ-SMD, изготовленные по групповой планарной технологии и прецизионной литографии, показаны на рис. 22.

В ГМИС СВЧ-SMD металлизированные отверстия расположены строго по периферии основания, никаких других отверстий в основании нет.

Разделить пластину ПАП на основания лазерным фрезерованием нельзя, так как по линии

реза образуется проводящий графитовый слой, который замыкает выводы. Поэтому предложено было разделять пластины ПАП путем плазмохимического скрайбирования на установке плазмохимического травления «Плазма ТМ5» и последующего механического разделения пластины ПАП на основания.

7. Процесс изготовления объемных алмазных крышек из ПАП

Для изготовления объемных алмазных крышек ГМИС СВЧ использован темплат-метод, который позволяет в едином технологическом процессе по групповой технологии изготавливать крышки размерами 5×5 ; 4×4 ; 3×3 ; 2×2 мм.

Технологический процесс изготовления объемных алмазных крышек из ПАП для ГМИС СВЧ (рис. 23) включает следующие технологические операции.

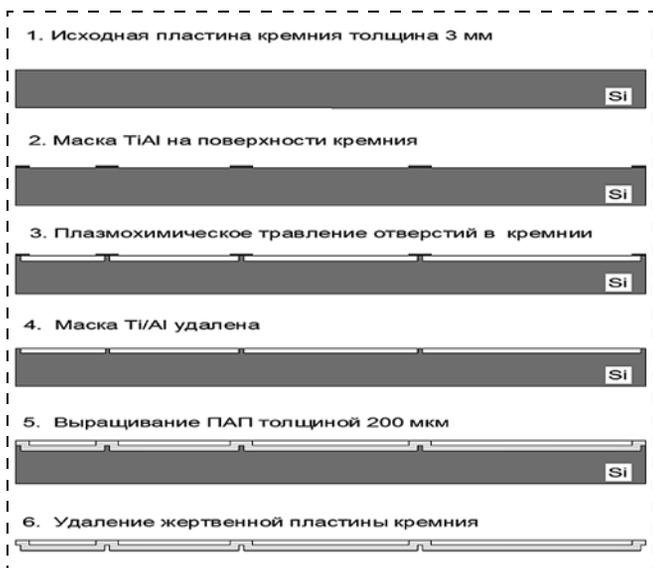


Рис. 23. Технологический процесс изготовления объемных крышек из ПАП для ГМИС СВЧ

1. Выбирается жертвенная пластина кремния толщиной 3 мм, диаметром 57 мм.

2. На всю лицевую поверхность жертвенной пластины кремния вакуумным напылением последовательно в одном технологическом процессе наносят слои Ti, Al толщиной 0,1 и 2 мкм соответственно, далее проводят фотолитографию, слои Ti, Al протравливают насквозь и формируют металлическую маску.

3. Проводится глубокое изотропное плазмохимическое травление отверстий в пластине кремния в реакторе установки «Плазма ТМ5» в плазме SF₆ на глубину 200 мкм. При этом на поверхности кремния изготавливают полости, соответствующие внешним размерам крышек корпусов SMD.

4. Металлическую маску, состоящую из слоев Ti, Al, полностью удаляют, и остается пластина кремния с полостями.

5. На всей поверхности пластины кремния, в полостях и стенках полостей выращивается ПАП толщиной 200...250 мкм.

6. После этого жертвенную пластину кремния удаляют путем травления и остается ПАП, содержащая массив крышек ГМИС СВЧ.

Далее следует операция разделения ПАП на отдельные крышки ГМИС СВЧ с помощью установки лазерного фрезерования «Каравелла-2».

Внешний вид объемных крышек ГМИС СВЧ с архитектурой 3D, изготовленных с помощью темплат-метода размерами 5 × 5, 4 × 4, 3 × 3, 2 × 2 мм соответственно, показан на рис. 24.

Аналогично можно изготавливать объемные крышки из ПАП прямоугольной формы и другие конструкционные компоненты с архитектурой 3D.

Конструкции ГМИС СВЧ-SMD четырех типоразмеров: 5 × 5, 4 × 4, 3 × 3 и 2 × 2 мм, содержащие алмазное основание и объемную алмазную крышку показаны на рис. 25.

В ГМИС СВЧ-SMD поверхностного монтажа металлизированные отверстия расположены строго по периферии основания, никаких других отверстий в основании нет. Герметизация ГМИС СВЧ осуществляется посредством электрической крышки объемной формы из ПАП, соединенной с диэлектрическим алмазным основанием клеем МС-Н или ЭЗК-184-11.

8. Создание ГМИС СВЧ, в том числе поверхностного монтажа

Для создания ГМИС СВЧ на алмазе — однокаскадного усилителя мощности X-диапазона частот использован кристалл GaN транзистора TGF2023-1 фирмы TriQuint США.

Усилитель рассчитывали по измеренным S-параметрам и оптимальным нагрузкам ПТШ

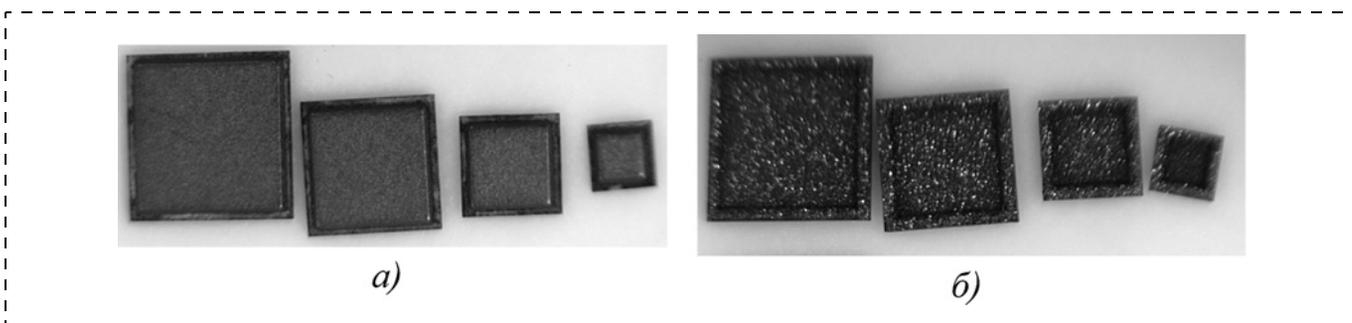


Рис. 24. Объемные крышки из ПАП четырех типоразмеров 5 × 5, 4 × 4, 3 × 3 и 2 × 2 мм соответственно: а — наружная сторона; б — внутренняя сторона

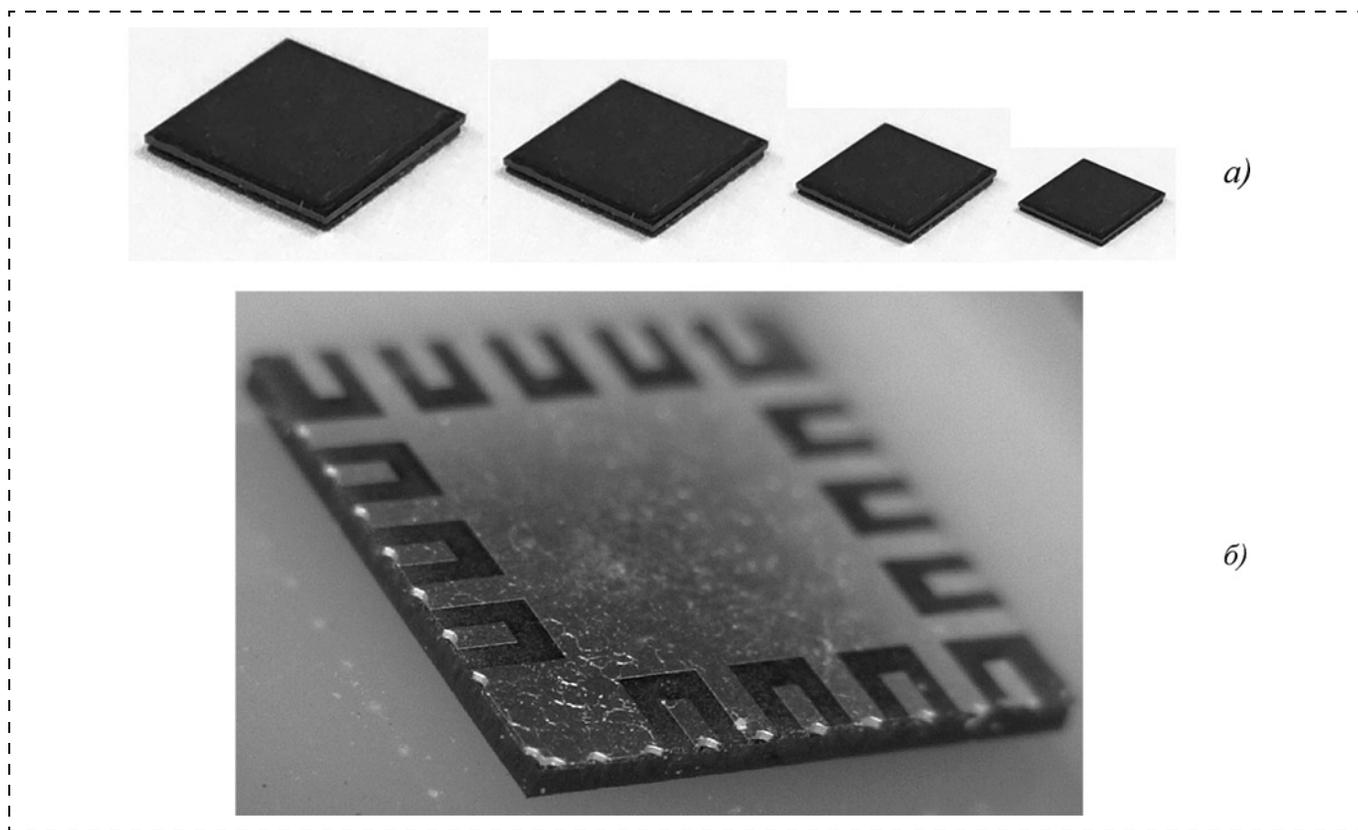


Рис. 25. ГМИС СВЧ-SMD четырех типоразмеров вид сверху (а); размером $5 \times 5 \times 0,6$ мм вид снизу (б)

с помощью программы ADS, позволяющей включить процесс проектирования ГМИС СВЧ в единую программу САПР. Программа ADS рассчитывает параметры пассивной части ГМИС с учетом взаимного влияния элементов, расположенных на поверхности платы, и влияния экрана.

Созданы и исследованы ГМИС СВЧ на алмазе — однокаскадные усилители мощности на одной алмазной плате, изготовленной из ПАП.

Для герметизации ГМИС СВЧ может использоваться как традиционная конструкция, так и новая конструкция ГМИС СВЧ на алмазной плате, герметизированная объемной алмазной крышкой. Конструкции алмазной платы из ПАП, ГМИС СВЧ в традиционном корпусе и в новом корпусе с алмазной крышкой показаны на рис. 26.

Вся пассивная часть ГМИС СВЧ на алмазе размещается на монолитной алмазной плате из ПАП размером $3,8 \times 2,8 \times 0,1$ мм.

На зародышевой стороне алмазной платы изготовлены все пассивные элементы схемы. На ростовой стороне алмазной платы — заземляющая металлизация, а в объеме платы — сквозные металлизированные заземляющие отверстия.

Кристалл мощного GaN транзистора TGF2023-1 монтируется на поверхность алмазной платы и соединяется с ее выводами с помощью золотой проволоки диаметром 20 мкм. Измерение параметров ГМИС СВЧ на алмазе проводили в оправке с коаксиально-микрополосковыми выводами. Питание на выводы питания ГМИС CDX подавалось через игольчатые зонды. Усилитель настраивали на максимальный КПД. Измеренные параметры двух образцов ГМИС СВЧ на алмазе — однокаскадного усилителя X-диапазона частот на транзисторе TGF2023-1, при входной мощности 0,5 Вт приведены на рис. 27.

Измерения показали, что ГМИС СВЧ на алмазе — усилители мощности X-диапазона частот имеют параметры сравнимые с параметрами GaN ПТШ.

Для измерения параметров ГМИС СВЧ-SMD были изготовлены основания и объемные крышки из ПАП с габаритными размерами 5×5 , 4×4 , 3×3 , 2×2 мм. Для измерения КСВН и потерь на внутреннюю поверхность основания ГМИС СВЧ-SMD монтировали МПЛ с волновым сопротивлением 50 Ом, изготовленную на плате арсенида галлия толщиной 100 мкм, которая соединена с выводами основания. Резуль-

таты измерения КСВН и потерь показаны на рис. 28.

Измерения показали, что ГМИС СВЧ-SMD имеют удовлетворительные параметры в X-диапазоне частот.

Созданы усилительные ГМИС СВЧ-SMD поверхностного монтажа на МИС СВЧ, конструкция которых показана на рис. 29.

ГМИС СВЧ-SMD имеет габаритные размеры $5 \times 5 \times 0,6$ мм. Все выводы ГМИС СВЧ-SMD

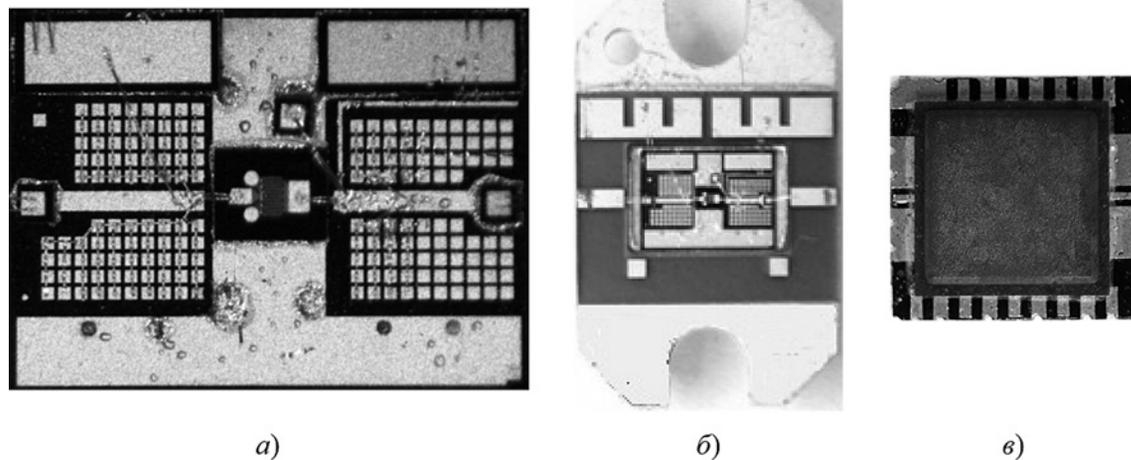


Рис. 26. Алмазная плата из ПАП (а); ГМИС СВЧ в корпусе (б) и в новом корпусе с алмазной крышкой (в)

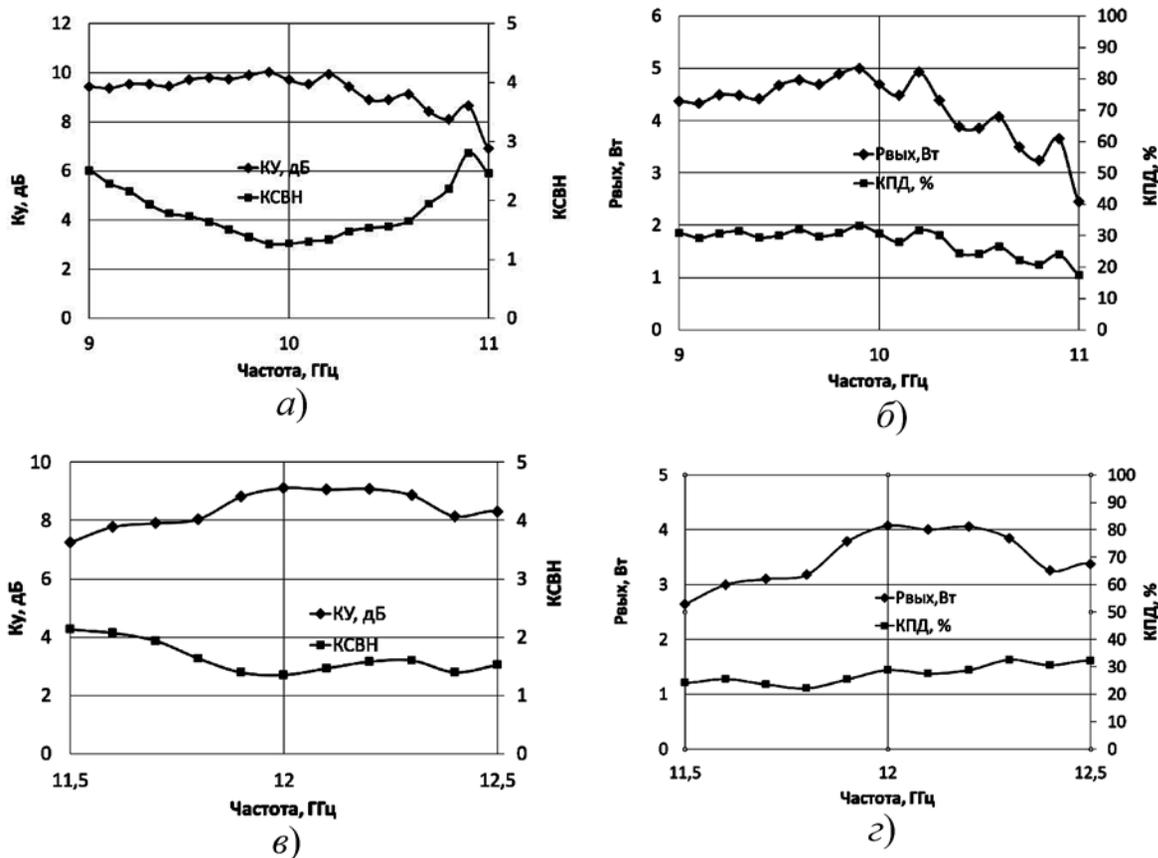


Рис. 27. ГМИС СВЧ на алмазе:

коэффициент усиления и входной КСВН образца № 1 (а); выходная мощность и КПД образца № 1 (б); коэффициент усиления и входной КСВН образца № 2 (в); выходная мощность и КПД образца № 2 (г)

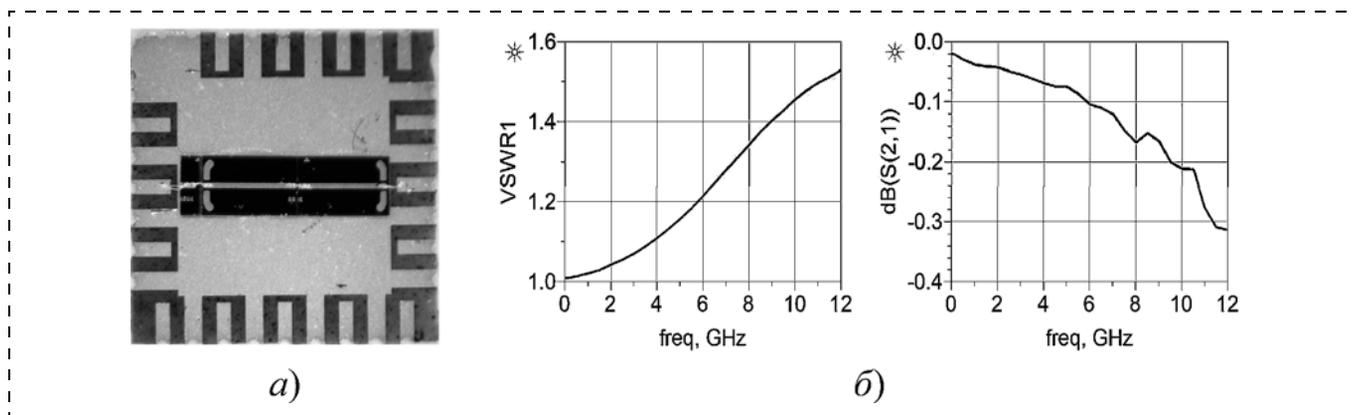


Рис. 28. ГМИС СВЧ-SMD с линией МПЛ (а), КСВН и прямые потери (б)

выведены на периферию основания. Основание имеет ключ в виде большой площадки. На основание установлены навесные активные и пассивные компоненты, объединенные в схему золотой проволокой диаметром 20 мкм.

Герметизируется ГМИС СВЧ-SMD алмазной крышкой, которая соединена с основанием с помощью изолирующего клея.

На крышке лазером написан номер ГМИС СВЧ и ключ в виде — А, которой совпадает с ключом на основании.

ГМИС СВЧ-SMD испытаны на герметичность, показатель герметичности $2,3 \cdot 10^{-3}$ Па · см³/с, критерий годности не более $6,65 \cdot 10^{-2}$ Па · см³/с по ГОСТ 5901-004—2010 (п. 5.2.11).

МИС СВЧ не является конечным продуктом и требует для включения дополнительных компонентов.

Расчетные параметры МИС СВЧ не совпали с измеренными параметрами ГМИС СВЧ-SMD, поэтому для подстройки КСВН пришлось до-

полнительно устанавливать на основании подстроечные компоненты L и C .

Измеренные параметры ГМИС СВЧ-SMD (M421426) до настройки и после настройки приведены на рис. 30.

После настройки входной КСВН в диапазоне частот стал меньше 2, а усиление увеличилось.

В процессе выполнения ОКР «Одноцветник ИЗ-РК» разработан ряд опытных образцов ГМИС СВЧ-SMD: M421426, M421427, M421430, M421431, параметры которых приведены в табл. 7.

Для измерения параметров МИС СВЧ в корпусе SMD в зарубежной практике используется тестовая печатная плата на основе КЛЭ с разъемами SMA. Метод тестовой платы позволяет проводить только выборочный контроль МИС СВЧ в корпусе SMD. При этом МИС СВЧ в корпусе SMD монтируют на печатную плату только один раз, повторное использование невозможно.

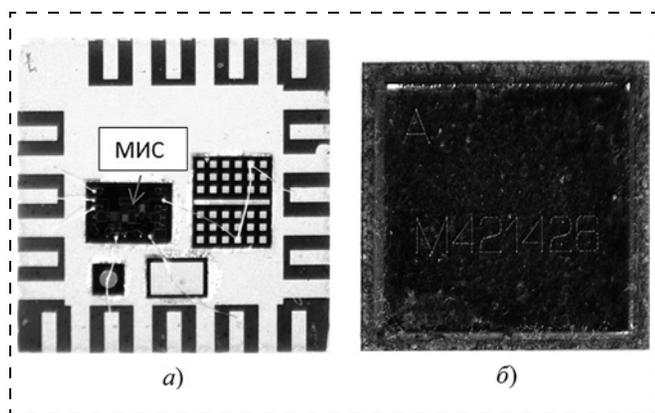


Рис. 29. Конструкция ГМИС СВЧ-SMD: а — основание с МИС СВЧ; б — крышка

9. Температура канала GaAs, GaN ПТШ на алмазной плате

Исследовано влияние алмазной платы из ПАП на температуру канала мощных полевых GaAs, GaN ПТШ. Для этого проведен расчет температуры канала мощных полевых GaAs, GaN ПТШ с алмазной платой и без нее.

Исходные данные для теплового расчета:

- теплопроводность меди — 401 Вт/(м · К);
- теплопроводность слоя клея — 15...30 Вт/(м · К), толщина — 10...20 мкм;
- теплопроводность арсенида галлия (GaAs) — 46 Вт/(м · К); теплопроводность нитрида галлия (GaN) — 130 Вт/(м · К); теплопроводность кар-

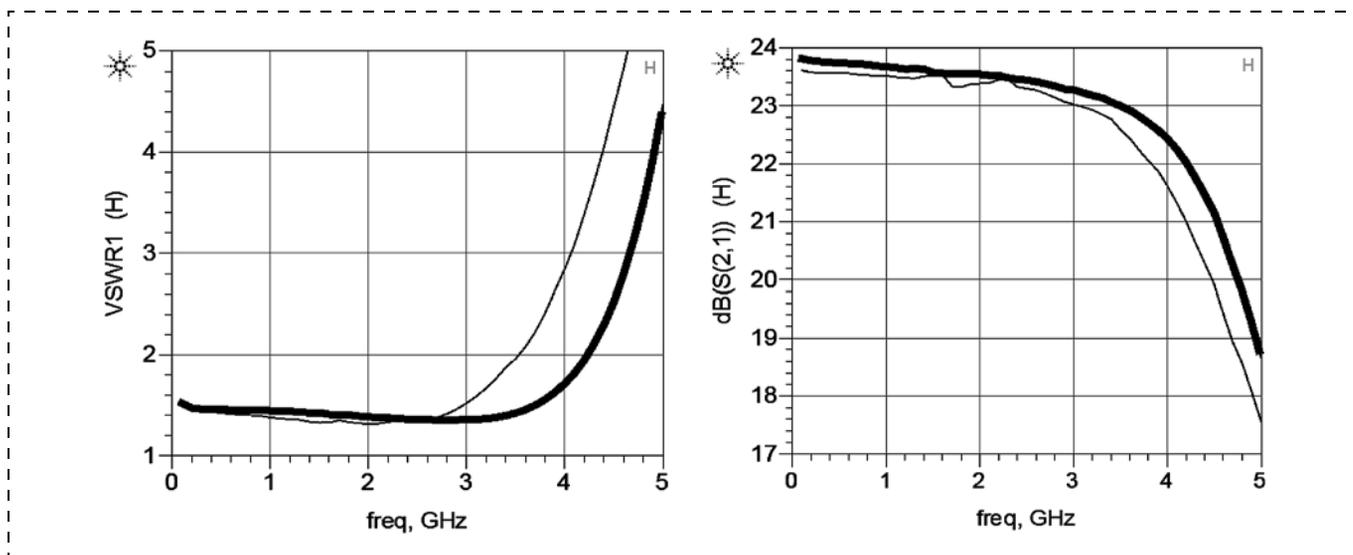


Рис. 30. Измеренные параметры ГМИС СВЧ-SMD до и после настройки

бида кремния (SiC) — 490 Вт/ (м · К); теплопроводность алмазной платы из ПАП (С) — 1000 Вт/(м · К).

Расчет температуры канала мощных полевых GaAs, GaN транзисторов выполнен для нескольких конструктивных вариантов.

Первый конструктивный вариант — кристалл мощного полевого GaAs транзистора на подложке арсенида галлия или GaN транзистора на подложке карбида кремния приклеен теплопроводящим клеем ЭКС-1 непосредственно к медному основанию. Конструкция и градиент температуры, соответствующие первому варианту, приведены на рис. 31, см. четвертую сторону обложки.

Верхний слой — медь размерами 300 × 100 × 5 мкм — имитирует усредненную область тепловыделения GaAs или GaN ПТШ; следующий слой — кристалл GaAs, SiC размерами 700 × 500 × 100 мкм; затем слой клея ЭКС-1 под кристаллом толщиной h ; нижний слой — медное основание с теплопроводностью 401 Вт/(м · К), размерами 4,7 × 4,5 × 0,5 мм.

При расчете температура нижней грани медного основания принята равной 27 °С. Клей ЭКС-1 имеет разброс по теплопроводности 15...30 Вт/(м · К), а по толщине 10...20 мкм.

Для мощного GaAs ПТШ при мощности тепловыделения 2,5 Вт температура области тепловыделения составит: при толщине клея 20 мкм, теплопроводности 15 Вт/(м · К) — 144,6 °С; при толщине клея 10 мкм, теплопроводности 30 Вт/(м · К) — 132,6 °С; без клея — 127,7 °С.

Для мощного GaN ПТШ при мощности тепловыделения 10 Вт температура области тепловыделения составит: при толщине клея 20 мкм, теплопроводности 15 Вт/(м · К) — 131,3 °С; при толщине клея 10 мкм, теплопроводности 30 Вт/(м · К) — 101,5 °С; без клея — 90,2 °С.

Второй конструктивный вариант — кристалл GaAs ПТШ или GaN ПТШ на подложке SiC приклеен теплопроводящим клеем к алмазной плате, а плата приклеена к медному основанию, показан на рис. 32, см. четвертую сторону обложки.

Таблица 7

№ п.п.	ГМИС СВЧ-SMD	Δf_p , ГГц	K_y , дБ	$K_{ш}$, дБ	$P_{вых}$, дБм	ОПЗ, дБ	$K_{ст}$, У	Питание	
								U, В	I, мА
1	M421426	3...3,5	16,5	1,3	18	33	2	+5/-5	120
2	M421427	0,05...4	14,5	1,5	17	27	2	+5/-5	120
3	M421430	0,5...6	10	3	21	31	2	+5/-5	170
4	M421431	0,5...6,2	14,5	2,4	11,4	21,4	2	+5/-5	65

В этой конструкции: верхний слой размерами $300 \times 100 \times 5$ мкм имитирует усредненную область тепловыделения ПТШ; второй слой — кристалл GaAs или SiC размерами $700 \times 500 \times 100$ мкм; следующий слой — клей ЭКС-1 под кристаллом; затем — алмазная плата размерами $2,7 \times 2,5 \times 0,1$ мм; нижний слой — медное основание размерами $4,7 \times 4,5 \times 0,5$ мм. При расчете температура нижней грани медного основания принята равной 27°C . Клей ЭКС-1 имеет разброс по теплопроводности $15...30$ Вт/(м·К), а по толщине $10...20$ мкм.

Для GaAs ПТШ при мощности тепловыделения $2,5$ Вт температура области тепловыделения составит: при толщине клея 20 мкм, теплопроводности 15 Вт/(м·К) — $144,4^\circ\text{C}$; при толщине клея 10 мкм, теплопроводности 30 Вт/(м·К) — $131,0^\circ\text{C}$.

Для GaN ПТШ при мощности тепловыделения 10 Вт температура области тепловыделения составит: при толщине клея 20 мкм, теплопроводности 15 Вт/(м·К) — $132,0^\circ\text{C}$; при толщине

клея 10 мкм, теплопроводности 30 Вт/(м·К) — $98,1^\circ\text{C}$.

Для арсенида галлия при мощности тепловыделения $2,5$ Вт расчетный прирост температуры за счет применения алмазного слоя приведен в табл. 8.

Для арсенида галлия при мощности тепловыделения $2,5$ Вт расчетный прирост температуры за счет применения клеевого слоя приведен в табл. 9.

Для карбида кремния при мощности тепловыделения 10 Вт расчетный прирост температуры за счет алмазного слоя приведен в табл. 10.

Для карбида кремния при мощности тепловыделения 10 Вт расчетный прирост температуры за счет применения клеевого слоя приведен в табл. 11.

Введение алмазной платы из ПАП между кристаллом GaAs ПТШ и медным основанием может привести:

— к незначительному охлаждению (на $-0,2\%$) при толщине слоя клея 20 мкм и его теплопроводности 15 Вт/(м·К);

Таблица 8

GaAs	T_{\max}	$\Delta T_{0\max}$	$\Delta/\Delta T_0, \%$	Клей					
				$h = 20$ мкм, $k = 15$			$h = 10$ мкм, $k = 30$		
				T_{\max}	ΔT_{\max}	$\Delta/\Delta T_0, \%$	T_{\max}	ΔT_{\max}	$\Delta/\Delta T_0, \%$
С + Cu	—	—	—	144,4	117,4	-0,2	131,0	104,0	-1,5
Медь	127,7	100,7	0	144,6	117,6	0	132,6	105,6	0

Примечание: $\Delta = \Delta T_{\max} - \Delta T_{0\max}$ (для меди без алмаза).

Таблица 9

GaAs	T_{\max}	$\Delta T_{0\max}$	$\Delta/\Delta T_0, \%$	Клей					
				$h = 20$ мкм, $k = 15$			$h = 10$ мкм, $k = 30$		
				T_{\max}	ΔT_{\max}	$\Delta/\Delta T_0, \%$	T_{\max}	ΔT_{\max}	$\Delta/\Delta T_0, \%$
С + Cu	—	—	—	144,4	117,4	16,7	131,0	104,0	3,3
Медь	127,7	100,7	0	144,6	117,6	16,8	132,6	105,6	4,9

Примечание: $\Delta = \Delta T_{\max} - \Delta T_{0\max}$.

Таблица 10

SiC	T_{\max}	$\Delta T_{0\max}$	$\Delta/\Delta T_0, \%$	Клей					
				$h = 20$ мкм, $k = 15$			$h = 10$ мкм, $k = 30$		
				T_{\max}	ΔT_{\max}	$\Delta/\Delta T_0, \%$	T_{\max}	ΔT_{\max}	$\Delta/\Delta T_0, \%$
С + Cu	—	—	—	132,0	105,0	0,7	98,2	71,2	-4,4
Медь	90,3	63,3	0	131,3	104,3	0	101,5	74,5	0

Примечание: $\Delta = \Delta T_{\max} - \Delta T_{0\max}$ (для меди без алмаза).

SiC	T_{\max}	$\Delta T_{0\max}$	$\Delta/\Delta T_0, \%$	Клей					
				$h = 20 \text{ мкм}, k = 15$			$h = 10 \text{ мкм}, k = 30$		
				T_{\max}	ΔT_{\max}	$\Delta/\Delta T_0, \%$	T_{\max}	ΔT_{\max}	$\Delta/\Delta T_0, \%$
C + Cu	—	—	—	132,0	105,0	65,9	98,2	71,2	12,5
Медь	90,3	63,3	0	131,3	104,3	64,8	101,5	74,5	17,7

Примечание: $\Delta = \Delta T_{\max} - \Delta T_{0\max}$.

— к слабому охлаждению (на $-1,5 \%$) при слое клея 10 мкм и его теплопроводности 30 Вт/(м · К).

Введение алмазной платы из ПАП между кристаллом GaN ПТШ на подложке SiC и медным основанием может привести:

— к незначительному перегреву (на 0,7 %) транзистора при толщине слоя клея 20 мкм и его теплопроводности 15 Вт/(м · К);

— к слабому охлаждению (на $-4,4 \%$) при слое клея 10 мкм и его теплопроводности 30 Вт/(м · К).

Таким образом, оба конструктивных варианта на медном основании без алмазной платы и на алмазной плате из ПАП по эффективности отвода тепла от GaAs ПТШ и GaN ПТШ на SiC оказались эквивалентны.

Зависимости температуры перегрева канала ПТШ (с алмазной платой и без нее) от толщины H теплопроводящего клея с теплопроводностью $k = 30$ Вт/(м · К) показаны на рис. 33 (см. четвертую сторону обложки), при выделяемой мощности: для GaAs ПТШ, равной 2,5 Вт/мм, и для GaN ПТШ, равной 10 Вт/мм.

Главный результат расчетов показывает, что введение алмазной платы дает слабое охлаждение канала ПТШ, которое ослабляется с ростом толщины клеевого слоя и приводит к повышению температуры канала ПТШ. Поэтому целесообразно использовать методы беспробочного монтажа кристаллов транзисторов и МИС на алмазную плату, чтобы, с одной стороны, отказаться от клеевого соединения и использовать пайку, а с другой стороны, исключить проводочные соединения и повысить повторяемость параметров ГМИС СВЧ нового поколения.

Таким образом, в соответствии с предложенной концепцией и классификацией созданы мощные усилительные ГМИС СВЧ на алмазе, в том числе поверхностного монтажа, пассивная часть которых изготовлена на одной монолитной алмазной плате с навесными кристаллами активных компонентов.

Заключение

Впервые в отечественной и зарубежной практике предложено конструктивное решение для ГМИС СВЧ, в том числе поверхностного монтажа, на монолитной алмазной плате из ПАП, которое обеспечивает высокий уровень интеграции и улучшение массогабаритных характеристик по сравнению с мощными ГИС СВЧ.

Теоретически и экспериментально исследованы потери в МПЛ и КЛЭ на алмазной подложке из ПАП и показано, что они сравнимы с потерями в МПЛ на подложке арсенида галлия.

Выбран материал подложки ГМИС СВЧ, а именно поликристаллическая алмазная пленка — ПАП, которая поставляется в виде гетеропластины ПАП-Si. Разработан технологический процесс отделения ПАП от жертвенного кремния.

Выбран метод изготовления отверстий в алмазной подложке из ПАП и оптимизированы методом математического планирования эксперимента технологические режимы плазмохимического травления отверстий в ПАП. Создана отечественная установка плазмохимического травления.

Впервые в отечественной практике создан технологический процесс изготовления монолитной алмазной платы ГМИС СВЧ с металлизированными отверстиями и объемной алмазной крышки по групповой планарной технологии и прецизионной литографии.

Созданы усилительные ГМИС СВЧ на алмазе с выходной мощностью около 5 Вт на GaN ПТШ и ряд ГМИС СВЧ-SMD поверхностного монтажа диапазона 0,05...6,2 ГГц.

Показано, что алмазная плата из ПАП, установленная между кристаллом ПТШ и медным основанием, дает слабое охлаждение температуры канала ПТШ при малой толщине клея, а с ростом толщины клея наблюдается снижение эффекта охлаждения и повышение температуры канала ПТШ.

Список литературы

1. **Темнов А. М., Дудинов К. В., Емельянов А. М.** и др. Новое поколение мощных усилительных ГМИС X-диапазона на алмазной плате и нитридгаллиевых транзисторах // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2017. Вып. 2 (533). С. 54—74.
2. **Патент** 2474921 РФ. Интегральная схема СВЧ / К. В. Дудинов, А. М. Темнов, и др. Патентообладатель ФГУП «НПП «Исток»; приоритет 30.08.2011; зарегистрир. 30.08.2011.
3. **Дудинов К. В., Темнов А. М., Лапин В. Г., Аверин В. В.** Application of CVD-diamond substrates for microwave semiconductor devices // Труды 10-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь. 2000. Вебер, 2000. С. 10—12.
4. **Патент** 2442241 РФ. Электронный прибор СВЧ / Ю. М. Богданов, А. М. Темнов, К. В. Дудинов, и др. Патентообладатель ФГУП «НПП «Исток»; приоритет 25.08.2010; зарегистрир. 10.02.2012.
5. **Патент** 2194337 РФ. Устройство для монтажа кристалла / А. М. Темнов, К. В. Дудинов, В. Л. Наумов. Патентообладатель ФГУП «НПП «Исток»; приоритет 22.06.2001; зарегистрир. 10.12.2002.
6. **Патент** 2258330 РФ. СВЧ интегральная схема / А. М. Темнов, К. В. Дудинов, В. Л. Наумов. Патентообладатель ФГУП «НПП «Исток»; приоритет 01.08.2003; зарегистрир. 20.02.2005.
7. **Дудинов К. В., Темнов А. М.** Design of microwave hybrid-monolithic integrated circuits with the use of flip-chip technique // Труды 11-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. 2001. Вебер, 2001. С. 128—129.
8. **MGA-62563** / фирма Agilent, США. URL: <http://datasheet.elcodis.com>.
9. **HMC479MP86** / фирма Hittite, США. URL: <https://www.alldatasheet.com>.
10. **HMC507LP5** / фирма Hittite, США. URL: <https://www.alldatasheet.com>.
11. **HMC490LP5** / фирма Hittite, США. URL: <https://www.alldatasheet.com>.
12. **HMC608LC4** / фирма Hittite, США. URL: <https://www.alldatasheet.com>.
13. **TGA2513-SM** / фирма TriQuint, США. URL: <https://www.alldatasheet.com>.
14. **HMC517LC4** / фирма Hittite, США. URL: <https://www.alldatasheet.com>.
15. **СНА2069-FAA** / фирма United Monolithic Semiconductors, Франция. URL: <https://www.alldatasheet.com>.
16. **Китайская** корпорация электронных технологий — CETC. URL: <http://www.cetc22.com/ru>.
17. **Патент** 2489769 РФ. Герметичный корпус для полупроводникового прибора или интегральной схемы СВЧ-диапазона / А. Г. Бабак, А. С. Адонин, Е. М. Воробьевский и др. Патентообладатель ООО «НПП ТЭЗ» / «Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод»; приоритет 28.12.2011; зарегистрир. 10.08.2013.
18. **Кондратюк Р.** ЛТСС — Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика // Промышленные нанотехнологии. Наноиндустрия. 2011. № 2. С. 26—30.
19. **Темнов А. М., Дудинов К. В., Емельянов А. М.** Корпуса SMD для герметизации мощных МИС диапазона до 40 ГГц // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. 2018. Вып. 2 (537). С. 22—43.
20. **Lee K., Hamada H., Matsuzaki H.** et al. 220—265 GHz active ×6 frequency multiplier MMIC with InP HEMT technology // 2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium — IMS, Philadelphia, PA, 2018, P. 765—76.
21. **Microwaves & RF**, 2017. No. 3. P. 88.
22. **Промышленный** каталог компании Northrop Grumman, 2017.
23. **Shivan T., Hossain M., Stoppel D.** et al. An ultra-broadband low-noise distributed amplifier in InP DHBT technology // Proceedings of the 48th European Microwave Conference, Madrid, Spain, Sep. 25—27, 2018, P. 1209—1212.
24. **Пластины** монокристаллов карбида кремния SiC и SiC подложки с эпитаксией. Фирма CREE. URL: <https://www.prosoft.ru>.
25. **Шурыгина В.** "Чудо-материал" графен новый конкурент на рынке РЧ-электроники. Ч. 1 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2014. № 4 (00135). С. 141—149.
26. **Шурыгина В.** «Чудо-материал» графен новый конкурент на рынке РЧ-электроники. Ч. 2 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2014. № 5 (00135). С. 151—163.
27. **CVD-алмаз** и алмазная электроника. ВШОПФ ННГУ. URL: <http://www.vshopf.unn.ru>
28. **Chen Y.** Diamond chemical vapor deposition and practical applications. Dissertation. 2009. ETD. 104 p. URL: <http://etd.auburn.edu>.
29. **ООО «ТВИНН»** Научно-прикладной центр. URL: <http://www.twinn-plasma.com/>
30. **Седов В. С.** Синтез тонких микро- и нанокристаллических алмазных пленок в СВЧ-плазме: дис. ... наиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук. 2013. 126 с.
31. **Совык Д. Н.** Плазмохимический синтез трехмерных структур из алмаза методом реплики: дис. ... наиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук. 2014. 111 с.
32. **Ральченко В. Г., Большаков А. П.** CVD-алмаз: синтез и свойства // Углеродная фотоника / под ред. В. И. Конова. М.: Наука, 2017. С. 9—133.
33. **Anaya J., Sun H., Pomeroy J.** Thermal Management of GaN-on-Diamond High Electron Mobility Transistors: Effect of the Nanostructure in the Diamond near Nucleation Region // Proc. of 15th IEEE IThERM Conference. 2016. P. 1558—1565.
34. **Поликристаллическая** алмазная пленка на подложке кремния. Технические условия ЦПКЛ 0100.001.001 ТУ / ИОФ РАН. Москва. 2018. 22 с.
35. **Поликристаллическая** алмазная пленка на подложке кремния. Технические условия ВНТФ.758779.001 ТУ / ООО «ТВИНН». Москва. 2018. 24 с.
36. **Дерябкин А. В.** Диффузионная термохимическая обработки поверхности алмаза // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 4. С. 35—37.
37. **Духновский М. П., Ратникова А. К., Леонтьев И. А.** и др. Термическая обработка поликристаллического CVD-алмаза с целью формирования гладкой поверхности // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, 2008. Вып. 2 (495). С. 41—46.
38. **Мальцев П. П., Редькин С. В., Скрипниченко А. С.** и др. Технология лазерной резки поликристаллических алмазных пластин // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 5. С. 44—48.

39. Патент 2537101 РФ. Способ прецизионной лазерно-плазмохимической резки пластин / Аристов В. В., Мальцев П. П., Редькин С. В., и др. — Патентообладатель ИСВЧПЭ РАН; приоритет 08.08.2013; зарегистрир. 30.10.2014.

40. Михайлов О. В. Что такое темплатный синтез // СОЖ. 1999. № 10. С. 42—50.

41. Голованов А. В., Бормашов В. С., Волков А. П., Тарелкин С. А., Буга С. Г., Бланк В. Д. Реактивное ионное травление поверхности синтетического алмаза // ТРУДЫ МФТИ. 2013. Т. 5, № 1. С. 31—35.

42. Темнов А. М. Формирование отверстий в алмазной подложке гибридно-монокристаллических интегральных схем СВЧ // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65, № 2. С. 174—182.

43. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 72 с.

44. Жуков В. В., Кривоногов В. П., Янин С. Н. Распыление мишени магнетронного диода в присутствии внешнего ионного пучка // Журнал технической физики. 2006. Т. 76, Вып. 4. С. 61—66.

A. M. Temnov, Ph. D., Senior Researcher, alexandertemnov@mail.ru,
JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, 141190, Russian Federation

Corresponding author:

Temnov Aleksandr M., Ph. D., Senior Researcher, JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, 141190, Russian Federation

E-mail: alexandertemnov@mail.ru

Hybrid Monolithic Microwave Integrated Circuits RF on Diamond

Received on March 27, 2020

Accepted on April 13, 2020

Powerful amplifying RF hybrid-monolithic integrated circuits (GMIS) on a diamond board including surface mounting have been created. A technological process for manufacturing diamond boards from polycrystalline diamond film (NCA) using group planar technology and precision lithography has been created. A technological process for manufacturing bulk diamond caps from NCA has been created. A technological process for separating a heteroplast (NCA-Si) and separating an entire NCA plate from sacrificial silicon Si has been developed. It is shown that plasma-chemical etching provides group production of holes based on planar technology and precision lithography. The technological modes of etching holes through an aluminum mask by the method of reactive ion etching with an inductively coupled plasma source (RIT-ISP) were optimized and the rate of etching holes in the NCA was obtained at about 1.1 microns/min. A mathematical model of the technological process is found and it is shown that etching occurs mainly in the oxygen environment. The possibility of etching holes in NCA with a diameter of 100 microns and a depth of more than 300 microns was investigated. It is shown that the rate of etching depends on the depth of the holes and is nonlinear, while etching occurs, both the walls of the holes and the aluminum mask.

Keywords: hybrid-monolithic RF integrated circuits on a diamond board; heteroplast (NCA-Si); polycrystalline diamond film (NCA) on sacrificial Si; manufacturing process of monolithic diamond boards; manufacturing process of bulk diamond caps from NCA; plasma-chemical etching of holes; metallization of holes with a vertical wall

For citation:

Temnov A. M. Hybrid Monolithic Microwave Integrated Circuits RF on Diamond, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 6. pp. 298—328.

DOI: 10.17587/nmst.22.298-328

References

1. Temnov A. M., Dudinov K. V., Yemelyanov A. M., Voronin A. A., Katkov D. A., Rogachev I. A., Meshkov O. I. A new generation of X-band high-power amplifying HMICs on a diamond board and gallium nitride transistors, *Jelektronnaja tekhnika. Ser. 1. SVCh-tehnika*, 2017. Issue. 2 (533), pp. 54—74 (in Russian).

2. Patent 2474921 RF. Integral'naya skhema SVCH / K. V. Dudinov, A. M. Temnov i dr. Patentoobladatel' FGUP

«NPP «Istok»; prioritet 30.08.2011; zaregistrir. 30.08.2011 (in Russian).

3. Dudinov K. V., Temnov A. M., Lapin V. G., Averin V. V. Application of CVD-diamond substrates for microwave semiconductor devices, *10-ya Mezhdunarodnaya konferenciya "SVCH-tehnika i telekommunikacionnye tekhnologii"*, Sevastopol', 2000, Veber, 2000, pp. 10—12.

4. Patent 2442241 RF. Elektronnyj pribor SVCH / Yu. M. Bogdanov, A. M. Temnov, K. V. Dudinov, i dr. Pat-

entoobladatel' FGUP «NPP «Istok»; prioritet 25.08.2010; zaregistrir. 10.02.2012 (in Russian).

5. **Patent** 2194337 RF. Ustrojstvo dlya montazha kristalla / A. M. Temnov, K. V. Dudinov, V. L. Naumov. Patentoobladatel' FGUP «NPP «Istok»; prioritet 22.06.2001; zaregistrir. 10.12.2002 (in Russian).

6. **Patent** 2258330 RF. SVCH integral'naya skhema / A. M. Temnov, K. V. Dudinov, V. L. Naumov. Patentoobladatel' FGUP «NPP «Istok»; prioritet 01.08.2003; zaregistrir. 20.02.2005 (in Russian).

7. **Dudinov K. V., Temnov A. M.** Design of microwave hybrid-monolithic integrated circuits with the use of flip-chip technique, *11-ya Mezhdunarodnaya konferenciya «SVCH-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii»*. Sevastopol', 2001, Veber, 2001, pp. 128–129.

8. **MGA-62563** / Agilent, USA, available at: <http://datasheet.elcodis.com>.

9. **HMC479MP86** / Hittite, USA, available at: <https://www.alldatasheet.com>.

10. **HMC507LP5** / Hittite, USA, available at: <https://www.alldatasheet.com>.

11. **HMC490LP5** / Hittite, USA, available at: <https://www.alldatasheet.com>.

12. **HMC608LC4** / Hittite, USA, available at: <https://www.alldatasheet.com>.

13. **TGA2513-SM** / TriQuint, USA, available at: <https://www.alldatasheet.com>.

14. **HMC517LC4** / Hittite, USA, available at: <https://www.alldatasheet.com>.

15. **CHA2069-FAA** / United Monolithic Semiconductors, France, available at: <https://www.alldatasheet.com>.

16. **CETC**, available at: <http://www.cetc22.com>.

17. **Patent** 2489769 RF. Germetichnyj korpus dlya poluprovodnikovogo pribora ili integral'noj skhemy SVCH-diapazona / A. G. Babak, A. S. Adonin, E. M. Vorob'evskij i dr. Patentoobladatel' OOO «NPP TEZ» / «Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie «Tomilinskij elektronnyj zavod»; prioritet 28.12.2011; zaregistrir. 10.08.2013 (in Russian).

18. **Kondratyuk R.** LTCC — Nizkotemperaturnaya sovместно obzhigaemaya keramika, *Promyshlennyye nanotekhnologii. Nanoindustriya. Nauchno-tehnicheskij zhurnal*, 2011, no. 2, pp. 26–30 (in Russian).

19. **Temnov A. M., Dudinov K. V., Emel'yanov A. M.** SMD packages for sealing high-power MICs in the range up to 40 GHz, *Elektronnaya tehnika. Ser. 1, SVCH-tehnika*. 2018, issue. 2 (537), pp. 22–43 (in Russian).

20. **Lee K., Hamada H., Matsuzaki H., Nosaka H., Song H.** 220–265 GHz Active ×6 Frequency Multiplier MMIC with InP HEMT Technology, *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium — IMS*, Philadelphia, PA, 2018, pp. 765–768.

21. **Microwaves & RF**, 2017, no. 3, p. 88.

22. **Catalog** Northrop Grumman, 2017.

23. **Shivan T., Hossain M., Stoppel D.** et al. An ultra-broadband low-noise distributed amplifier in InP DHBT technology, *Proceedings of the 48th European Microwave Conference*, Madrid, Spain, Sep. 25–27, 2018, pp. 1209–1212.

24. **Plastiny** monokristallov karbida kremniya SiC i SiC podlozhki s epitaksiej. Firma CREE, available at: <https://www.prosoft.ru> (in Russian).

25. **Shurygina V.** "Chudo-material" grafen novyj konkurent na rynke RCH-elektroniki. Ch. 1, *Elektronika: nauka, tehnologiya, biznes*, 2014, no. 4 (00135), pp. 141–149 (in Russian).

26. **Shurygina V.** "Chudo-material" grafen novyj konkurent na rynke RCH-elektroniki. Ch. 2, *Elektronika: nauka, tehnologiya, biznes*, 2014, no. 5 (00135), pp. 151–163 (in Russian).

27. **CVD-almaz** i almaznaya elektronika. VSHOPF NNGU, available at: <http://www.vshopf.unn.ru> (in Russian).

28. **Chen Y.** Diamond chemical vapor deposition and practical applications. Dissertation. 2009. ETD. 104 p., available at: <http://etd.auburn.edu>.

29. **OOO «TVINN»** Nauchno-prikladnoj centr, available at: <http://www.twinn-plasma.com/> (in Russian).

30. **Sedov V. S.** Sintez tonkih mikro- i nanokristallicheskih almaznyh plenok v SVCH-plazme: dis. ... na soisk. uch. st. kand. fiz.-mat. Nauk, 2013, 126 p. (in Russian).

31. **Sovyk D. N.** Plazmohimicheskij sintez tryohmernyh struktur iz almaza metodom repliki: dis. ... na soisk. uch. st. kand. fiz.-mat. Nauk, 2014, 111 p. (in Russian).

32. **Ral'chenko V. G., Bol'shakov A. P.** CVD-almaz: sintez i svoystva, *Uglerodnaya fotonika*/ red. V. I. Konov, Moscow, Nauka, 2017, pp. 9–133. (in Russian).

33. **Anaya J., Sun H., Pomeroy J.** Thermal Management of GaN-on-Diamond High Electron Mobility Transistors: Effect of the Nanostructure in the Diamond near Nucleation Region, *15th IEEE ITherm Conference*. 2016, pp. 1558–1565.

34. **Polikristallicheskaya** almaznaya plenka na podlozhke kremniya. Tehnicheskie usloviya CPKL 0100.001.001 TU / IOF RAN, Moscow, 2018, 22 p. (in Russian).

35. **Polikristallicheskaya** almaznaya plenka na podlozhke kremniya. Tehnicheskie usloviya VNTF.758779.001 TU / OOO «TVINN». Moscow, 2018, 24 p. (in Russian).

36. **Deryabkin A. V.** Diffuzionnaya termohimicheskaya obrabotka poverhnosti almaza, *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2018, no. 4, pp. 35–37 (in Russian).

37. **Duhnovskij M. P., Ratnikova A. K., Leont'ev I. A.** et al. Termicheskaya obrabotka polikristallicheskogo CVD-almaz s cel'yu formirovaniya gladkoj poverhnosti, *Elektronnaya tehnika. Ser. 1. SVCH-tehnika*, 2008, Iss. 2 (495), pp. 41–46 (in Russian).

38. **Maltsev P. P., Redkin S. V., Skripnichenko A. S., Poboykina N. V., Doukhnovsky M. P., Smirnova A. K.** Technology for Laser Cutting of the Polycrystalline Diamond Plate, *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*, 2015, no. 5, pp. 44–48.

39. **Patent** 2537101 RF. Sposob precizionnoj lazerno-plazmohimicheskoy rezki plastin / Aristov V. V., Mal'cev P. P., Red'kin S. V., i dr. — Patentoobladatel' ISVCHPE RAN; prioritet 08.08.2013; zaregistrir. 30.10.2014 (in Russian).

40. **Mihajlov O. V.** Chto takoe templatnyj sintez, *SOZH*, 1999, no. 10, pp. 42–50 (in Russian).

41. **Golovanov A. V., Bormashov V. S., Volkov A. P., Tarelkin S. A., Buga S. G., Blank V. D.** Reaktivnoe ionnoe travlenie poverhnosti sinteticheskogo almaza, *TRUDY MFTI*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 31–35 (in Russian).

42. **Temnov A. M.** Formirovanie otverstij v almaznoj podlozhke gibridno-monolitnyh integral'nyh skhem SVCH, *Radiotekhnika i elektronika*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 174–182 (in Russian).

43. **Danilin B. S., Syrchin V. K.** *Magnetronnye raspylitel'nye sistemy*, Moscow, Radio i svyaz', 1982, 72 p. (in Russian).

44. **Zhukov V. V., Krivobokov V. P., Yanin S. N.** Sputtering of the magnetron diode target in the presence of an external ion beam, *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 51, no. 4, pp. 453–458.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 538.953

DOI: 10.17587/nmst.22.329-334

С. В. Булярский, д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр., bulyar2954@mail.ru,
Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва,

В. В. Светухин, д-р физ.-мат. наук, проф., директор,
"Научно-производственный комплекс "Технологический центр", Москва

ОБРАЗОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ ПОСЛЕ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ОКСИДА КРЕМНИЯ

Поступила в редакцию 23.04.2020

Разработана теоретическая модель образования нанокристаллов кремния после ионной имплантации. Модель позволяет оценить кинетику роста нанокристаллов при различных температурах и дозах ионного легирования. Она согласуется с экспериментом и может быть использована для предварительной оценки условий формирования нанокристаллов кремния в матрице оксида кремния.

Ключевые слова: модель, кремний, нанокристаллы, кинетика формирования, теория образования нанокристаллов

Введение

Нанокристаллы кремния (Si—NC) имеют новые важные свойства, которые позволяют их использовать в различных областях микроэлектроники и оптоэлектроники [1]. Методы получения Si—NC разнообразны, но одним из них является ионное легирование оксида кремния кремнием [2, 3]. Атомы кремния внедряют в матрицу оксида кремния в процессе ионного легирования, затем полученный материал отжигают, и в объеме оксида образуются нанокристаллы кремния. Как правило, образование нанокристаллов происходит в результате распада пересыщенного твердого раствора в полупроводнике [4—6].

В твердых телах явление распада твердого раствора представляет собой сложный процесс [4—6]. Схематически его можно рассматривать в виде последовательности нескольких стадий (рис. 1), которые мы будем пояснять на примере имплантированных атомов в твердое тело с последующим отжигом: атомы внедренной примеси хаотически расположены в матрице вещества.

Отжиг приводит к самоорганизации атомов примеси и вызывает следующую трансформацию: *появляются зародыши кластеров → зародыши преобразуются в кластеры → кластеры уплотняются и превращаются в зародыши нанокристалла → зародыши растут и происходит упорядочение внутри них → возникает нанокристалл как выделение второй равновесной фазы.*

Процесс образования Si—NC можно рассматривать как *фазовый переход первого рода*, а его кинетику разделить на *следующие стадии* [7—9].

На первой стадии происходит образование зародышей новой фазы. Различные модели для ее описания можно найти в работах [10—12], а также [13, 14]. *На второй стадии* происходит рост скоплений без изменения их числа. Этот период образования нанокристаллов обычно удовлетворительно описывает теория Хэма [1, 15—17]. *На третьей стадии*, заключительной, происходит «переконденсация» атомов, из которых состоят частицы новой фазы, растворение мелких и рост крупных частиц. При этом происходит уменьшение числа ассоциатов и увеличение их

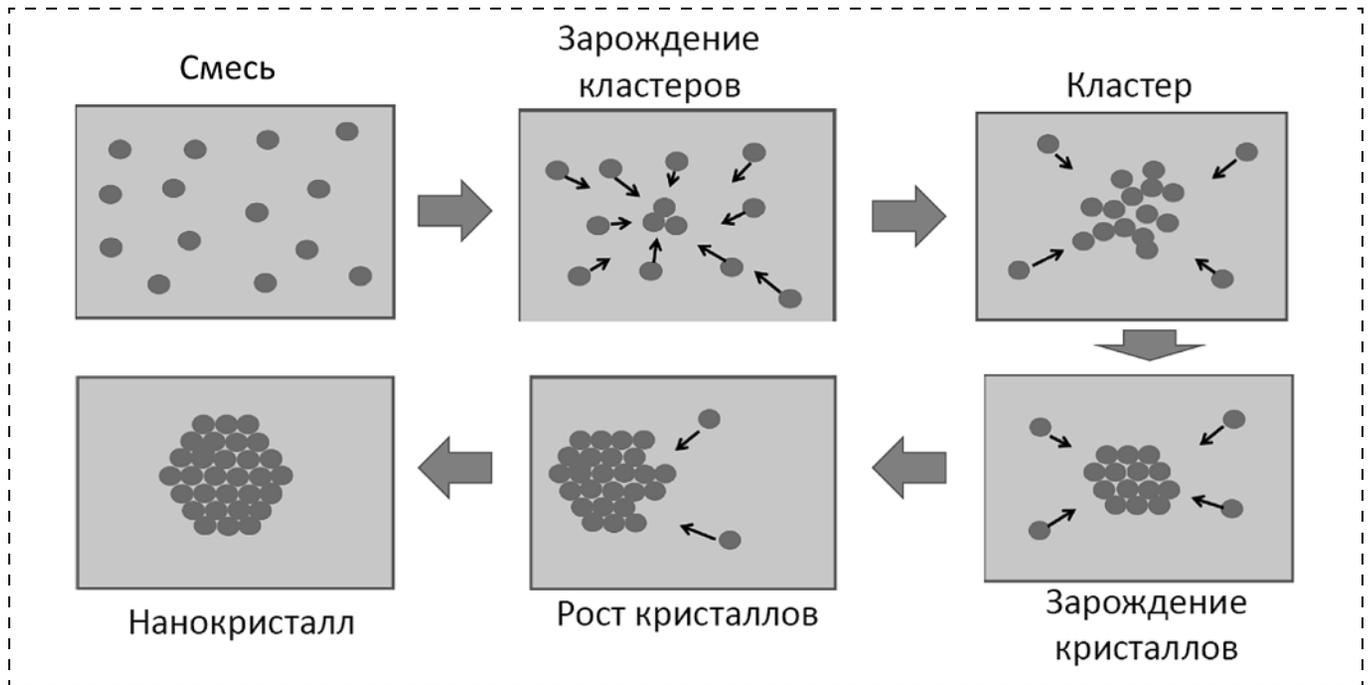


Рис. 1. Этапы формирования нанокристалла из примесных атомов, введенных в твердое тело

среднего размера при сохранении общего числа избыточных атомов, составляющих основу выделений. Эта стадия была названа *коалесценцией* [11–12].

В настоящей работе развивается кинетика формирования нанокристаллов кремния, которая происходит на второй стадии, и проводится сопоставление данной теоретической модели с экспериментом.

Кинетика формирования нанокристаллов

Существуют две модели роста нанокристаллов: гомогенная и гетерогенная. Гомогенному образованию скоплений соответствует схема: $A_i + A \leftrightarrow A_{i+1}$. В случае гетерогенного роста скоплений процесс описывается с помощью следующего уравнения: $A_i C + A \leftrightarrow A_{i+1} C$. Центры зарождения захватывают и испускают примесные атомы (мономеры), которые внедрены в диэлектрическую матрицу, что описывается с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dN_i}{dt} = -N_i(k_i N + g_i) + g_{i+1} N_{i+1} + k_{i-1} N N_{i-1}; \\ \frac{dN}{dt} = -N \sum_{i=0} k_i N_i - \sum_{i=1} g_i N_i; \end{cases} \quad (1)$$

$$N_C = \sum_{i=0} N_i(t) = \text{const},$$

где N_i — средняя по объему концентрация центров зарождения, присоединивших i частиц; N — концентрация мономеров; $k_i N$ и g_i — скорости захвата и выброса мономера для центра зарождения, присоединившего i частиц; N_C — концентрация центров зарождения.

Диффузионный рост скоплений (см. ниже формулу (2a)) происходит на начальной стадии процесса, когда формируется фрактальный кластер, затем кластер уплотняется и превращается в нанокристалл. В этом случае на границе между нанокристаллом и матрицей может существовать потенциальный барьер. Рост нанокристалла на этой стадии называется реакционным (см. ниже формулу (2b)), так как захват примеси на центр роста происходит в результате реакции, связанной с преодолением потенциального барьера. Для кинетических коэффициентов можно использовать следующие выражения [18]:

$$k_D = 4\pi D b; \quad (2a)$$

$$k_i = \begin{cases} k_D = 4\pi D b; \\ k_R = \frac{4\pi b^2 D}{r_0} \exp\left\{-\frac{E_i}{kT}\right\}, \end{cases} \quad (2b)$$

где k_D — вероятность захвата мономера на центр роста по диффузионному механизму формирования нанокристалла; k_R — вероятность захвата мономера на центр роста по реакционному механизму формирования нанокристалла; D — ко-

эффицент диффузии примеси в матрице; b — период решетки матрицы; r_0 — радиус нанокристалла.

Если предположить, что концентрация центров зарождения не меняется во времени, то можно найти точное решение системы (1) в следующем виде:

$$t = C + {}_2F_1\left(\alpha, \alpha, 1 + \alpha, -\frac{N(0) + N_C - N_E}{N_E - N}\right) \times \left(\frac{N_C}{N_E - N}\right)^\alpha \frac{1}{k_D N_C}, \quad (3)$$

где константа C определяется уравнением:

$$C = -{}_2F_1\left(\alpha, \alpha, 1 + \alpha, -\frac{N(0) + N_C - N_E}{N_E - N(0)}\right) \times \left(\frac{N_C}{N_E - N(0)}\right)^\alpha \frac{1}{k_D N_C}.$$

Здесь ${}_2F_1$ — гипергеометрическая функция; α — фрактальная размерность для сферического нанокристалла $\alpha = 0,33$; $N(0)$ — начальная концентрация мономеров; N_E — конечная равновесная концентрация мономеров; N_C — концентрация центров зарождения, которая в данной модели считается постоянной.

Для уравнения (3) можно получить аппроксимации для начальной и конечной кинетики формирования нанокристалла:

$$\frac{N(t) - N_e}{N(0) - N_e} = \exp\left\{-N_C\{(1 - \alpha)[N(0) - N_e]^\alpha k_D t\}^{\frac{1}{1 - \alpha}}\right\}, \quad (4)$$

$$N(t) - N_e = A \exp\{-N_C^{1 - \alpha} [N(0) + mN_C - N_e]^\alpha k_D t\}. \quad (5)$$

Проверку данной модели проводили на основе экспериментов по формированию нанокристаллов после ионного легирования оксида кремния кремнием. Кремний вводили в оксид кремния методом ионной имплантации, причем доза имплантации должна быть значительная для образования пересыщенного раствора кремния. Имплантированные ионы проникают в твердое тело и распределяются в нем по закону Га-

усса [19]. Глубина проникновения и дисперсия распределения тем меньше, чем меньше энергия ионов. Глубина проникновения составляет 60...100 нм, если энергия пучка — 40...80 кэВ. Дисперсия распределения ионов в твердом теле небольшая, если энергия пучка мала, то она составляет около 25 нм. Поэтому можно создать в локальной области оксида достаточно большую концентрацию ионов кремния (10^{22} см^{-3}) путем ионного легирования [20].

Образование нанокристаллов кремния было исследовано во многих работах, например [1—3]. Экспериментальные результаты этих работ позволяют сделать вывод, что концентрация центров зарождения нанокристаллов кремния имеет значение $(1...3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Это значение было принято для расчетов. В значение кинетического коэффициента образования нанокристаллов кремния (4) и (5) входит коэффициент диффузии кремния в оксиде кремния. Это значение было взято из работы [21] и равно $D_{Si} = 0,8 \exp(-5,2/kT)$. Заметим, что это значение коэффициента диффузии соответствует оксиду кремния, который выращен методом термического оксидирования. Оксид, который после этого подвергается ионному легированию в значительных дозах, может содержать большое число дефектов, и тогда коэффициент диффузии будет выше. В работе [21] приведены результаты, которые показывают, что это увеличение может быть в 100 раз. Таким образом, коэффициент диффузии не известен достаточно точно.

На рис. 2, а приведены результаты вычислений среднего размера нанокристалла одном нанокристалле кремния по формуле (3) при диффузионном механизме формирования, а рис. 2, б — при реакционном механизме формирования, когда образуется потенциальный барьер на границе растущего нанокристалла и оксида. Рис. 3 показывает число атомов кремния в нанокристалле, которые вычислены при тех же условиях синтеза, что и результаты рис. 2. Граница «*No crystals*» была проведена условно, когда число ассоциированных атомов равно двум.

Результаты расчета (см. рис. 2 и 3) показывают, что с повышением температуры рост нанокристалла происходит быстрее. Это связано с тем, что ускоряется диффузия атомов кремния, так как энергия активации для диффузии велика, то и рост происходит существенно быстрее. Рост существенно затрудняется, если на границе нанокристалла с матрицей окружающего его вещества есть потенциальный барьер. Этот барьер

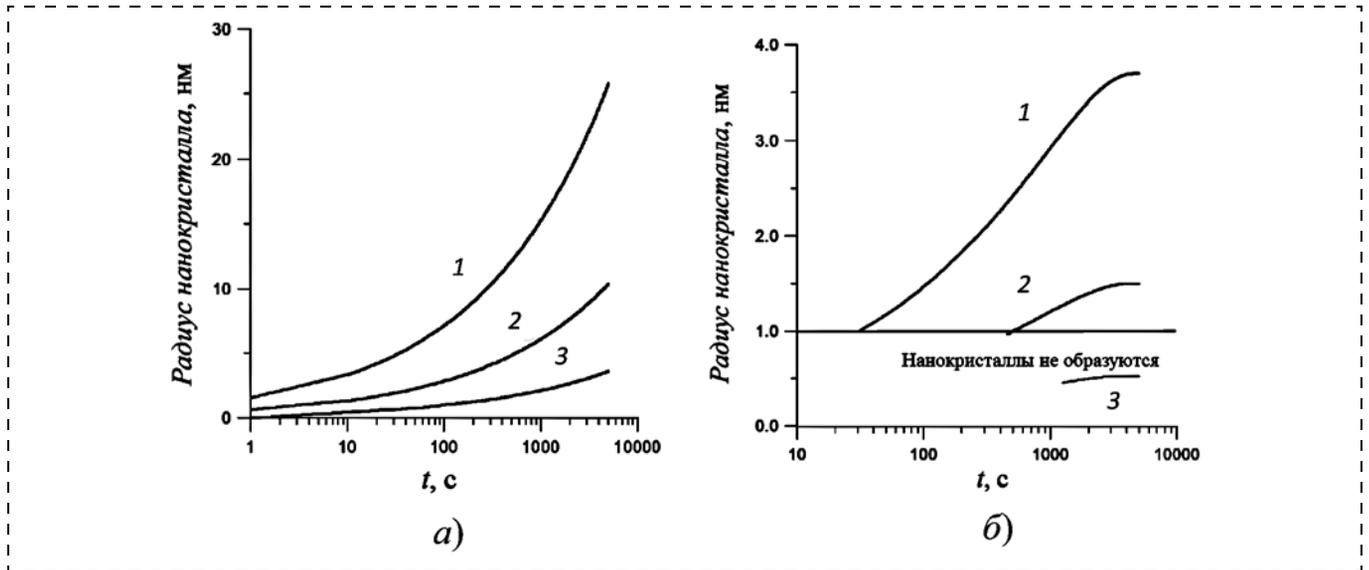


Рис. 2. Рост среднего размера нанокристалла с увеличением времени отжига при различных температурах: *а* — диффузионный механизм роста; *б* — реакционный механизм роста; температура отжига, °С: 1 — 1250; 2 — 1150; 3 — 1050

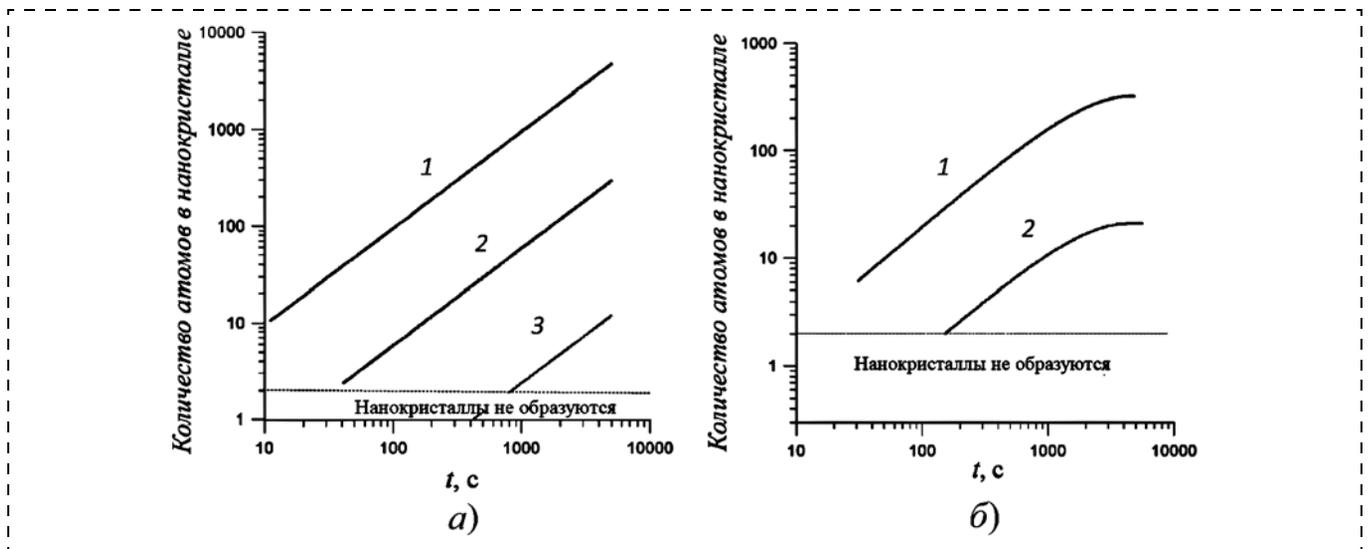


Рис. 3. Число атомов в нанокристалле в зависимости от времени и температуры роста. Температура отжига, °С: 1 — 1250; 2 — 1150; 3 — 1050. Расчет выполнен при условиях: *а* — диффузионный механизм роста нанокристалла; *б* — реакционный механизма роста с учетом существования потенциального барьера на границе нанокристалл — матрица

может возникать, когда кластер, который не имеет выраженной границы с матрицей, уплотняется и превращается в нанокристалл (см. рис. 1).

Расчеты (см. рис. 2) показывают, что при низких температурах (1050 °С в конкретном случае) кластер может возникать, но как только он уплотняется, то рост такого нанокристалла невозможен и он останавливается. Это также показано на рис. 2, *б* и рис. 3. Синтез нанокристаллов при наличии потенциального барьера на их поверхности попадает в зону «No crystals», где их рост не может быть при данных условиях синтеза.

Результаты расчета при температуре 1050 °С на рис. 3, *б* не показаны, так как при этих условиях ассоциации атомов нет.

Рост скопления атомов примеси типа кластера фрактального вида возможен и при этой температуре (рис. 3, *а*), однако он растет гораздо медленнее. Можно сделать вывод, что при более высоких температурах растут оформленные нанокристаллы более крупных размеров, а при низких температурах формируются наночастицы, которые являются кластерами фрактального типа, они не имеют выраженной границы с мат-

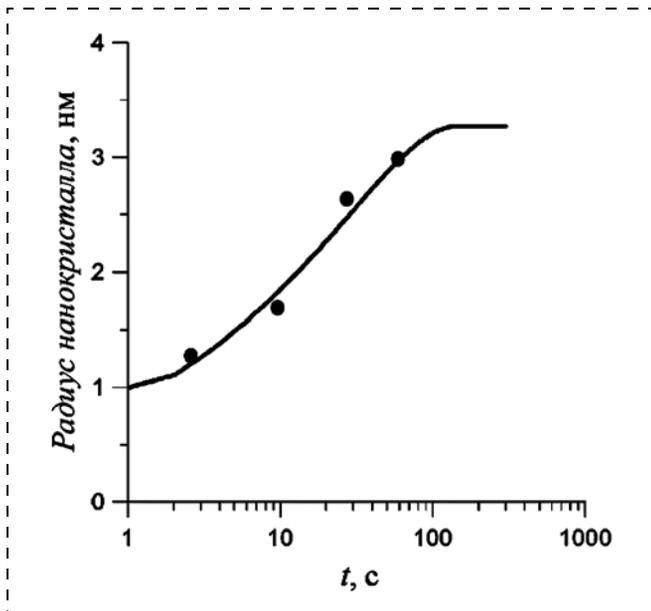


Рис. 4. Рост нанокристаллов кремния со временем отжига при температуре 1050 °С. Концентрация имплантированных в оксид атомов кремния 10^{22} см^{-3} . Точки — эксперимент работы [2], сплошная линия — расчет

рицей, в которой растут. Для того чтобы понять тип скопления, необходимо также учитывать концентрацию имплантированных атомов. Нанокристаллы могут расти и при низких температурах, если концентрация имплантированных атомов велика.

Нами был сделан расчет, который соответствует условиям синтеза нанокристаллов кремния в работе [2], при концентрации имплантированных атомов в локальной области 10^{22} см^{-3} . Результаты этого расчета представлены на рис. 4, они удовлетворительно согласуются с данными работы [2], если предположить, что температура отжига 1050 °С, как принято в этой работе, а энергия активации диффузии в первый момент 4,8 эВ и растет до 5 эВ по мере формирования нанокристалла.

Таким образом, на образование нанокристаллов оказывает влияние как температура, так и начальная концентрация имплантированных атомов. Тем более что при большом их числе в матрице образуется большое количество дефектов, что должно способствовать ускорению диффузии. Разработанная теоретическая модель согласуется с результатами экспериментов.

Работа выполнена при Государственной поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 0004-2019-0001.

Список литературы

1. **Arduca E., Perego M.** Doping of silicon nanocrystals // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2017. Vol. 62. P. 156—170.
2. **Yang P., Gwilliam R. M., Crowe I. F., Papachristodoulou N., Halsall M. P., Hylton N. P., Hulko O., Knights A. P., Shah M., Kenyon A. J.** Size limit on the phosphorous doped silicon nanocrystals for dopant activation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2013, Vol. 307. P. 456—458.
3. **Ischenko A. A., Fetisov G. V., Aslanov L. A.** Nanosilicon. Properties, Synthesis, Applications, Methods of Analysis and Control. CRC Press Taylor & Francis Group. 2015. 713 p.
4. **Фистуль В. И.** Распад пересыщенных твердых растворов. М.: Металлургия, 1977. 274 с.
5. **Bulyarskii S. V., Svetukhin V. V., Prikhod'ko O. V.** Spatially inhomogeneous oxygen precipitation in silicon // *Semiconductors*. 1999. Vol. 33, No. 11. P. 1157—1162.
6. **Fistul' V. I.** Impurities in semiconductors: solubility, migration, and interactions. Crc Press. 2004. 448 p.
7. **Слезов В. В., Шмельтзер Ю.** Максимальное число частиц новой фазы, зарождающихся при распаде твердых растворов // *Физика твердого тела*. 1997. Том. 39, № 12. С. 2210—2216.
8. **Kukushkin S. A., Osipov A. V.** Kinetics of phase transitions of the first kind at the asymptotic stage // *J. Experimental and Theoretical Physics*. 1998. Vol. 113. P. 2186—2208.
9. **Kukushkin S. A., Osipov A. V.** Thin Film Condensation Processes // *Usp. Fiz. Nauk*. 1998. Vol. 168, No. 10. P. 1083—1115.
10. **Volmer M.** Kinetik der Phasenbildung, Th. Steinkopf, Dresden 1939.
11. **Слезов В. В., Шмельтзер Ю.** Начальная стадия диффузионного распада твердого раствора // *Физика твердого тела*. 1994. Том 36, № 2. С. 353—362.
12. **Slezov V., Shmelzer Yu.** Kinetics of formation and growth of a new phase with a definite stoichiometric composition // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1994. Vol. 55, Iss. 3. P. 243—251.
13. **Turnbull D.** Theory of reaction limited precipitation // *Acta Met.* 1953. Vol. 1. P. 764—772.
14. **Turnbull D.** Theory of cellular precipitation // *Acta Metallurgica*. 1955. Vol. 3. P. 55—63.
15. **Ham F. S.** Theory of Diffusion-Limited Precipitation // *Phys. Chem. Solids*. 1958. Vol. 6. P. 335—350.
16. **Ham F. S.** Diffusion-Limited Growth of Precipitate Particles // *J. Appl. Phys.* 1959. Vol. 30. P. 1518—1525.
17. **Ham F. S.** Stress-Assisted Precipitation on Dislocation // *J. Appl. Phys.* 1959. Vol. 30. P. 915—927.
18. **Gohnson W. L., Shankey O. G., Dow G. P.** Deep level associated with impurities and bond — centered interstitial site in silicon // *Phys.Rev. B*. 1984. Vol. 30. P. 2070—2079.
19. **Bording J. K., Taft J.** Molecular-dynamics simulation of growth of nanocrystals in an amorphous matrix // *Phys. Rev. B*. 2000. Vol. 62. P. 8098—8109.
20. **Jeynes C., Barradas N. P., Marriott P. K., Boudreault G., Jenkin M., Wendler E., Webb R. P.** Elemental thin film depth profiles by IBA simulated annealing // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2003. Vol. 36. P. R97—R126.
21. **Takahashi T., Fukatsu S., Itoh V. A., Uematsu M., Fujiwara A., Kageshima H., Takahashi Y.** Self-diffusion of Si in thermally grown SiO_2 under equilibrium conditions // *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 93, Iss. 6. P. 3674—3676. DOI: 10.1063/1.1554487.

S. V. Bulyarskiy, D. Sc., Senior Researcher, bulyar2954@mail.ru,
Institute of Nanotechnology of Microelectronics RAS, Moscow,
V. V. Svetukhin, Professor, Director,
"Scientific and Production Complex" Technology Center "Moscow"

Corresponding author:

Bulyarskiy Sergey V., D. Sc., Senior Researcher, Institute of Nanotechnology Microelectronics RAS, Moscow, Russian Federation
E-mail: bulyar2954@mail.ru

Solubility of Impurities in Silicon Nanocrystals

Received on April 23, 2020

Accepted on April 28, 2020

The authors have developed a theoretical model for the formation of silicon nanocrystals after ion implantation. The model allows one to evaluate the kinetics of nanocrystal growth at various temperatures and doses of ion doping. It is consistent with experiment and can be used for a preliminary assessment of the conditions for the formation of silicon nanocrystals in a silicon oxide matrix.

Keywords: silicon, nanocrystals, kinetics of formation, theory of nanocrystal formation

For citation:

Bulyarskiy S. V., Svetukhin V. V. Solubility of Impurities in Silicon Nanocrystals, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 6, pp. 329–334.

DOI: 10.17587/nmst.22.329-334

References

1. **Arduca E., Perego M.** Doping of silicon nanocrystals, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2017, vol. 62, pp. 156–170.
2. **Yang P., Gwilliam R. M., Crowe I. F., Papachristodoulou N., Halsall M. P., Hylton N. P., Hulko O., Knights A. P., Shah M., Kenyon A. J.** Size limit on the phosphorous doped silicon nanocrystals for dopant activation, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2013, vol. 307, pp. 456–458.
3. **Ischenko A. A., Fetisov G. V., Aslanov L. A.** *Nanosilicon. Properties, Synthesis, Applications, Methods of Analysis and Control*. CRC Press Taylor & Francis Group. 2015. 713 p.
4. **Fistul' V. I.** *Decay of Supersaturated Semiconductor Solid Solutions*. Moscow, Metallurgiya, 1977. 274 p. (in Russian).
5. **Bulyarskiy S. V., Svetukhin V. V., Prikhod'ko O. V.** Spatially inhomogeneous oxygen precipitation in silicon, *Semiconductors*, 1999, vol. 33, no. 11, pp. 1157–1162.
6. **Fistul' V. I.** *Impurities in semiconductors: solubility, migration, and interactions*. Crc Press, 2004, 448 p.
7. **Slezov V. V., Shmelzer Yu.** The maximum number of particles of a new phase, nucleating during the decomposition of solid solutions, *PHYSICS OF THE SOLID STATE*, 1997, vol. 39, no. 12, pp. 2210–2216.
8. **Kukushkin S. A., Osipov A. V.** Kinetics of phase transitions of the first kind at the asymptotic stage, *J. Experimental and Theoretical Physics*, 1998, vol. 113, pp. 2186–2208.
9. **Kukushkin S. A., Osipov A. V.** Thin Film Condensation Processes, *Usp. Fiz. Nauk*, 1998, vol. 168, no. 10, pp. 1083–1115.
10. **Volmer M.** *Kinetik der Phasenbildung*, Th. Steinkopf, Dresden, 1939.
11. **Slezov V., Shmelzer Yu.** The initial stage of diffusion decomposition of solid solutions, *PHYSICS OF THE SOLID STATE*, 1994, vol. 36, no. 2, pp. 353–362.
12. **Slezov V. V., Shmelzer Yu.** Kinetics of formation and growth of a new phase with a definite stoichiometric composition, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1994, vol. 55, iss. 3, pp. 243–251.
13. **Turnbull D.** Theory of reaction limited precipitation, *Acta Met.*, 1953, vol. 1, pp. 764–772.
14. **Turnbull D.** Theory of cellular precipitation, *Acta Metallurgica*, 1955, vol. 3, pp. 55–63.
15. **Ham F. S.** Theory of Diffusion-Limited Precipitation, *Phys. Chem. Solids*. 1958, vol. 6, pp. 335–350.
16. **Ham F. S.** Diffusion-Limited Growth of Precipitate Particles, *J. Appl. Phys.*, 1959, vol. 30, pp. 1518–1525.
17. **Ham F. S.** Stress-Assisted Precipitation on Dislocation, *J. Appl. Phys.*, 1959, vol. 30, pp. 915–927.
18. **Gohnson W. L., Shankey O. G., Dow G. P.** Deep level associated with impurities and bond — centered interstitial site in silicon, *Phys. Rev. B.*, 1984, vol. 30, pp. 2070–2079.
19. **Bording J. K., Taft J.** Molecular-dynamics simulation of growth of nanocrystals in an amorphous matrix, *Phys. Rev. B*, 2000, vol.62, pp. 8098–8109.
20. **Jeynes C., Barradas N. P., Marriott P. K., Boudreault G., Jenkin M., Wendler E., Webb R. P.** Elemental thin film depth profiles by IBA simulated annealing, *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2003, vol. 36, R97–R126.
21. **Takahashi T., Fukatsu S., Itoh V. A., Uematsu M., Fujiwara A., Kageshima H., Takahashi Y.** Self-diffusion of Si in thermally grown SiO₂ under equilibrium conditions, *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 93, iss. 6, pp. 3674–3676. DOI: 10.1063/1.1554487.

А. Н. Алешин, д-р физ.-мат. наук, глав. науч. сотр., a.n.aleshin@mail.ru,
О. А. Рубан, канд. техн. наук, науч. сотр., mux.05@mail.ru,
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова
Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)

ДЕГРАДАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОГРАММИРУЕМОЙ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОЙ ЯЧЕЙКЕ. ЯВЛЕНИЕ И ПРИЧИНЫ ЕГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Поступила в редакцию 27.04.2020

Изучались особенности поведения мемристоров на основе Ge_xSe_y твердых электролитов с Ag активным и W инертным электродами при предельных режимах, которые выражались в повышенном значении амплитуды напряжения, равной 3 В, при подаче двухполярного треугольного сигнала, генерируемого при частотах 5 и 20 Гц. Было выявлено, что при частоте 20 Гц, помимо предполагаемого классического режима работы, наблюдается также «обратный» режим, соответствующий мемристорам, у которых изменена геометрия расположения электродов, когда в качестве верхнего электрода используется инертный электрод. Показано, что причиной возникновения «обратного» режима работы мемристора является электролитический осадок ионов серебра, формирующийся на инертном W электроде в условиях импульсного электроосаждения и вследствие этого обладающий повышенной плотностью. Наличие плотного электроосадка позволяет ионам серебра участвовать в формировании токопроводящего канала даже при работе мемристора в области отрицательных напряжений. Возможный механизм формирования токопроводящего канала при выбранных условиях работы электролитической ячейки обсуждается.

Ключевые слова: мемристор, программируемая металлизированная ячейка, деградация, токопроводящий канал, металлическая нить, вольт-амперная характеристика, морфология

Введение

Развитие методов и технологических приемов создания наноразмерных объектов позволило предсказать явление резистивной памяти [1], а в 2008 г. изготовить элемент, обладающий резистивной памятью, — мемристор [2]. Данный объект имеет переменное сопротивление, которое зависит от значения прошедшего через него электрического заряда. Эффект резистивной памяти достигается, в частности, при использовании программируемых металлизированных ячеек (PМС — *programmable metallization cell*) на основе твердых электролитов, таких как Ge_xS_y , Ge_xSe_y , As_2S_3 , а также оксидов переходных металлов: Ti,

Ta, Hf, Ni. Необходимым условием для появления эффекта резистивной памяти является формирование в рабочем теле мемристора (толщина которого составляет 20...50 нм) токопроводящего канала. В случае использования при создании мемристора оксидов переходных металлов для образования токопроводящего канала необходимо провести специальную подготовительную операцию — электроформовку. В PМС токопроводящий канал формируется, как правило, непосредственно в процессе работы мемристора. В этом случае канал представляет собой металлическую нить. Наличие токопроводящего канала является общей чертой для обоих типов мемристоров.

В случае использования оксидов переходных металлов, например оксидов титана или гафния, ответственными за структурные изменения, происходящие при формировании токопроводящего канала, являются заряженные кислородные вакансии [3], образующиеся в области анода (как правило, в качестве анода используется платина), в то время как в твердых электролитах на основе соединений Ge_xS_y , Ge_xSe_y , As_2S_3 основным химическим элементом, участвующим в формировании токопроводящего канала, являются ионы активного (по отношению к данному электролиту) электрода *PMC* [4–6]. Чаще всего в качестве материала активного электрода *AE* (*active electrode*) выступают серебро (Ag) или медь (Cu). При этом второй электрод *CE* (*counter electrode*) является электрохимически инертным металлом, например платиновым (Pt), вольфрамовым (W) или иридиевым (Ir). Электрическое напряжение, как правило, подается на активный (верхний) электрод мемристора, а инертный (нижний) электрод заземляется.

Мемристор имеет два состояния: низкоомное (*low resistance state* — *LRS*) и высокоомное (*high resistance state* — *HRS*). Переключение из состояния *HRS* в состояние *LRS* называют *SET switching*, или просто *SET*, поскольку это состояние считается логической единицей, а переключение из состояния *LRS* в состояние *HRS*, как правило, называют *RESET switching*, или просто *RESET*. Такое переключение переводит мемристор в состояние логического нуля.

Представляется, что мемристоры, являющиеся планарными низкоразмерными объектами с толщиной около 50 нм и обладающие при этом, как показали многочисленные эксперименты [7, 8], высокой скоростью переключения (порядка микросекунд), наилучшим образом соответствуют требованиям современной энергонезависимой памяти. Привлекательным свойством мемристоров является их низкое энергопотребление, что позволяет использовать их в искусственных нейроморфных компьютерных системах с новой технологией хранения, обработки и передачи данных. Данные обстоятельства обуславливают повышенный интерес исследователей к этим объектам. Число публикаций, посвященных различным аспектам этой проблемы, растет из года в год.

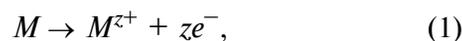
Цель работы состояла в исследовании особенностей работы мемристоров на основе Ge_xSe_y твердых электролитов при высоком значении амплитуды сигнала двухполярного треугольного

профиля, подаваемого на активный электрод при различных частотах его генерации.

Физико-химические основания формирования токопроводящего канала в твердых электролитах

Одним из способов выявления особенностей поведения мемристоров является изучение их работы в условиях предельных режимов, например при высоких и низких частотах их переключения. Для исследуемого в настоящей работе мемристора на основе твердого электролита в качестве такого условия можно рассматривать достаточно большой интервал изменения подаваемого на активный электрод сигнала при варьируемых частотах его генерации. Процесс образования токопроводящего канала в твердом электролите характеризуется следующими стадиями.

1. Анодное растворение элемента *M* (материала *AE*), в течение которого приповерхностные ионы *AE* попадают в твердый раствор. Данная стадия характеризуется следующей электрохимической реакцией:



где символом M^{z+} обозначен катион элемента *M*, находящийся в твердом электролите, и *z* — число электронов, участвующих в обмене между элементом *M* и твердым электролитом.

2. Миграция катионов M^{z+} через слой твердого электролита по направлению к инертному электроду *CE* под воздействием сильного электрического поля.

Восстановление и электрокристаллизация *M* на поверхности инертного электрода *CE* в соответствии с катодной реакцией осаждения



Процесс электрокристаллизации протекает в условиях воздействия электрического поля и приводит к образованию токопроводящего канала (металлической нити), растущей преимущественно в направлении активного электрода. После того как металлическая нить вырастет настолько далеко, что сможет создать гальванический контакт между двумя электродами, *PMC* переходит в состояние *ON*. *PMC* будет находиться в состоянии *ON* до тех пор, пока к электроду *M* не будет приложено достаточно большое отрицательное напряжение и не произойдет электролитическое растворение токопроводящего ка-

нала. В этом случае электрическая цепь будет разорвана и ячейка перейдет в исходное состояние *OFF*.

Общее выражение для скорости миграции v ионов в твердых электролитах под действием электрического поля — стадия 2 — в рамках представлений о термически активируемых скачках ионов [9] имеет следующий вид [10]:

$$v \approx fa \exp\left(-\frac{U_a}{kT}\right) \sinh(qEa/2kT), \quad (3)$$

где f — частота скачков ионов из одного равновесного положения в другое; a — период кристаллической решетки; U_a — энергетический барьер; q — заряд мигрирующего иона; E — напряженность электрического поля; k — постоянная Больцмана; T — термодинамическая температура. Введя критерий $E_0 = 2kT/qa$, а также используя такую кинетическую константу, как подвижность иона m ($m = qfa^2 \exp[-U_a/kT]/(kT)$), выражение (3) можно упростить, рассмотрев случаи сильных ($E \gg E_0$) и слабых ($E \ll E_0$) электрических полей. Для этих двух предельных случаев зависимость v от E будет иметь вид:

$$v = mE \text{ для } E \ll E_0, \quad (4a)$$

$$v = mE_0 \exp(E/E_0) \text{ для } E \gg E_0. \quad (4б)$$

Выражение (4a) является уравнением Нернста — Эйнштейна, и оно фактически отражает справедливость закона Ома для слабых электролитов. Создаваемые в *РМС* электрические поля являются сильными электрическими полями (в первую очередь вследствие наноразмерной толщины твердого электролита), что отражается на форме вольт-амперных характеристик (ВАХ) [11]. Таким образом, процесс ионного дрейфа в *РМС* подчиняется выражению (4б). Используемые в *РМС* в качестве твердых электролитов селениды и сульфиды находятся в аморфном состоянии, которое в связи с имеющимися в системе полостями характеризуется дальним беспорядком и, следовательно, наличием цепочек путей ускоренной диффузии. Быстрое протекание стадии 2 в указанных выше твердых электролитах обеспечивается также высокой концентрацией носителей зарядов M^{z+} , что достигается подбором веществ при конструировании *РМС*. Таким образом, можно сделать вывод, что лимитирующие стадиями работы *РМС* будут стадии 1 и 3.

Стадии 1 и 3 являются стадиями переноса электронов (и, соответственно, электрического заряда) через межфазную границу электрод —

электролит. Их протекание требует превышения возникающего на межфазной границе равновесного электрического потенциала (потенциала Нернста) φ_{eq} , обусловленного различной химической природой электродов и твердого электролита. При подаче на электроды *РМС* электрического потенциала φ разной полярности в цепи возникает электрический ток, плотность которого i описывается уравнением Батлера — Фольмера [12], оно применительно к рассматриваемому нами случаю имеет следующий вид:

$$i = i_0 \left[\exp\left(\frac{(1-\alpha)ze\Delta\varphi}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha ze\Delta\varphi}{kT}\right) \right], \quad (5)$$

где i_0 — ток обмена; α — коэффициент переноса заряда; $\Delta\varphi$ — перенапряжение ($\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{eq}$). Ток обмена i_0 соответствует динамическому равновесию при обмене зарядами между электродом и электролитом при $\Delta\varphi = \varphi_{eq}$. Значение тока обмена в *РМС* используется в качестве критерия для оценки состояния активного электрода (например, Ag или Cu), изменение которого может быть вызвано рядом причин, в частности его окислением. Первый член в выражении (5) соответствует анодному растворению (окислению), а второй член — реакции восстановления ионов M^{z+} , протекающей на катоде (при этом должен учитываться знак перенапряжения, $\Delta\varphi > 0$ для анодного процесса и $\Delta\varphi < 0$ для катодного процесса). В большинстве используемых в *РМС* химических соединений (достаточно большое число примеров химических соединений приведено в обзоре [6]) выражение (5) можно свести к двум предельным случаям: слабому и сильному перенапряжению.

При малых значениях перенапряжения ($|\Delta\varphi| \ll kT/ze$), т. е. в случаях, близких к равновесию, оба члена в выражении (5) дают свой вклад в величину i , при этом в рамках сделанного ограничения выражение (5) приобретает линейный вид:

$$i = \frac{i_0 ze}{kT} \Delta\varphi = \frac{1}{R_p} \Delta\varphi, \quad (6)$$

где множитель $i_0 ze/kT$ имеет размерность, обратную размерности сопротивления. Фигурирующая в выражении (6) величина R_p называется сопротивлением поляризации. Случай малых перенапряжений имеет место в слабых электролитах, преимущественно в водных растворах, и при работе мемристоров на основе твердых электролитов не реализуется.

В сильных электрических полях достигается большое перенапряжение ($|\Delta\phi| \gg kT/ze$), что позволяет выражение (5) представить в следующем виде:

$$\Delta\phi = \frac{kT}{aze} \ln i_0 - \frac{kT}{aze} \ln i, \quad (7)$$

которое широко используют в электрохимии для определения коэффициента переноса заряда α и тока обмена i_0 [13]. Согласно экспериментальным данным, полученным в работе [14], стадия 3 является лимитирующей стадией процесса переноса заряда в системе $\text{Ag}/\text{Ge}_x\text{Se}_y/\text{Pt}$ в силу особенностей процесса осаждения ионов серебра на инертный электрод. Аналогичный результат был получен и для системы $\text{Cu}/\text{SiO}_2/\text{Pt}$ [15], однако причиной торможения переноса заряда в области инертного электрода была электрокристаллизация ионов меди на Pt электрод. В обеих системах процесс переноса заряда определялся перенапряжением на катоде *PMC*, и применительно к этим случаям выражение (7) может быть записано в виде

$$\Delta\phi_{\text{cathodic}} = \frac{kT}{aze} \ln i_0 - \frac{kT}{aze} \ln i. \quad (8)$$

Изложенные выше представления о различных стадиях переноса заряда в *PMC* необходимо учитывать при проявлении нестандартных явлений в работе мемристора в экстремальных условиях, которые могут отражать протекание тех или иных деградационных процессов.

Экспериментальная часть

Были исследованы мемристоры, изготовленные фирмой Knowm Inc, США, характерной особенностью которых является стандартное поведение ВАХ, схожее с поведением ВАХ мемристоров на основе оксидов металлов. Строение мемристора показано на рис. 1. В качестве активного электрода мемристора используется серебро (Ag), а инертного электрода — вольфрам (W). Механизм реализации самоформирующегося в процессе работы мемристора токопроводящего канала возможен за счет наличия внутри аморфной матрицы начальных димеров Ge-Ge и тенденции серебра агломерировать с другими атомами Ag. Рекомендуются диапазон переключения для таких мемристоров от $-0,6$ до $0,6$ В, однако производитель допускает функционирование мемристора и в более широком интервале изменения напряжения.

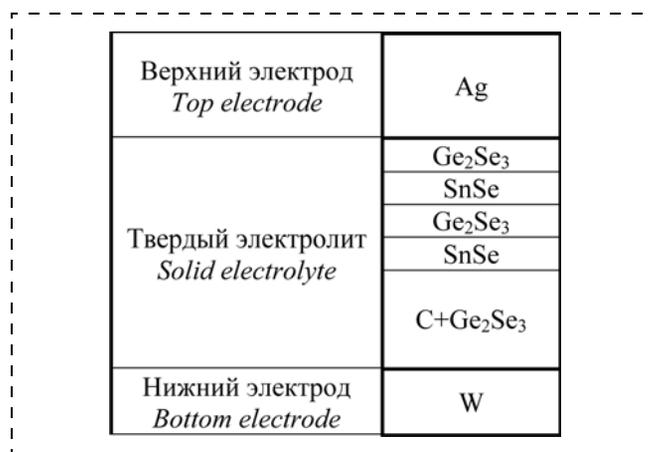


Рис. 1. Послойная схема строения *PMC* на основе твердого электролита Ge_2Se_3

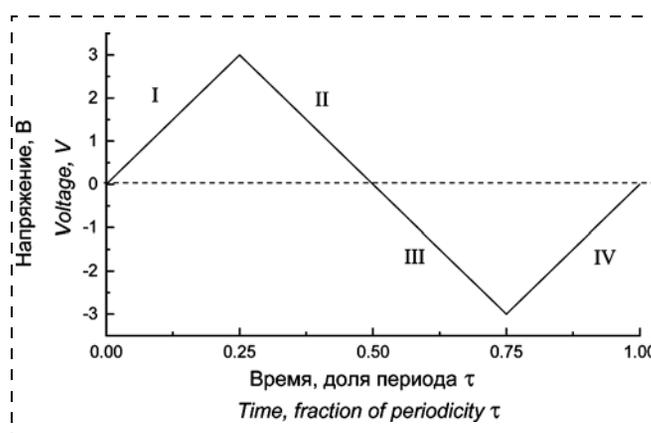


Рис. 2. Двухполярный сигнал треугольного профиля, развернутый во времени с периодом τ , подаваемый на верхний активный электрод при измерении ВАХ. Римскими цифрами обозначены различные участки сигнала, соответствующие положительному (участки I и IV) и отрицательному (участки II и III) склонам профиля

Исследование мемристоров проводили на автоматизированном измерительном стенде, созданном в ИСВЧПЭ РАН, который состоит из: 1) шасси NI PXI — 1078; 2) источника-измерителя NI PXIe — 4140; 3) компьютера для управления измерительными приборами и обработки результатов. Такая установка позволяет выполнять многократные и непрерывные измерения ВАХ мемристора, что дает возможность проводить исследования, направленные на изучение деградационных процессов. Измерения ВАХ мемристора проводили на частотах 5 и 20 Гц в диапазоне измерения напряжения от -3 до 3 В. При измерении ВАХ мемристора на верхний электрод подавалось напряжение, изменяющееся по двухполярному треугольному профилю, показанному на рис. 2. Для удобства дальнейшего опи-

сания разобьем подаваемый сигнал на четыре участка. Участок I будет соответствовать восходящей ветви сигнала на промежутке напряжений от 0 до 3 В. Участки II и III — нисходящие, от 3 до 0 В и от 0 до -3 В соответственно, и участок IV — восходящий, от -3 до 0 В.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 показаны коллекции ВАХ для первых 10 циклов работы мемристора, полученных при различных частотах. Видно, что поведение ВАХ для двух изученных частот различно. При работе мемристора с частотой 5 Гц (рис. 3, а) характер ВАХ по мере увеличения порядкового номера цикла практически не меняется, в то время как при частоте 20 Гц (рис. 3, б) более поздние по времени построения ВАХ имеют тенденцию к вырождению (деградации), что приводит к снижению рабочего тока мемристора и к более пологим ветвям ВАХ. Более детально характер изменения ВАХ мемристора по мере увеличения числа рабочих циклов при частоте 20 Гц показан на рис. 4. и рис. 5.

На рис. 4 приведена первая из измеренных ВАХ. Ветвь ВАХ, соответствующая первому участку подаваемого сигнала (т. е. при изменении напряжения в интервале 0–3 В), имеет характерный для работы *PMC* вид: наличие достаточно крутых восходящей и нисходящей ветвей, обрезаемых в области больших и малых токов. Видно, что ВАХ имеет гистерезис с достаточно выраженными переходами в состояние *SET* и *RESET*. На вставках к рис. 4 показана эволюция токопроводящего канала в соответствии с режимом изменения напряжения на активном электроде.

Состоянию *ON* соответствует полностью сформированная металлическая нить (рис. 4, вставка 2), поэтому участок ВАХ

в этом случае описывается законом Ома. Разрушение металлической нити (рис. 4, вставка 3) происходит в отрицательной области напряжений (при значениях напряжения от -2,5 до -3 В), при этом протекающий через мемристор ток является фактически током утечки как при работе обычного конденсатора.

Показанная на рис. 5 ВАХ резко отличается от ВАХ, показанной на рис. 4. Она была получена после нескольких циклов работы мемристора и характеризуется линейной зависимостью тока от напряжения на участках I и IV подава-

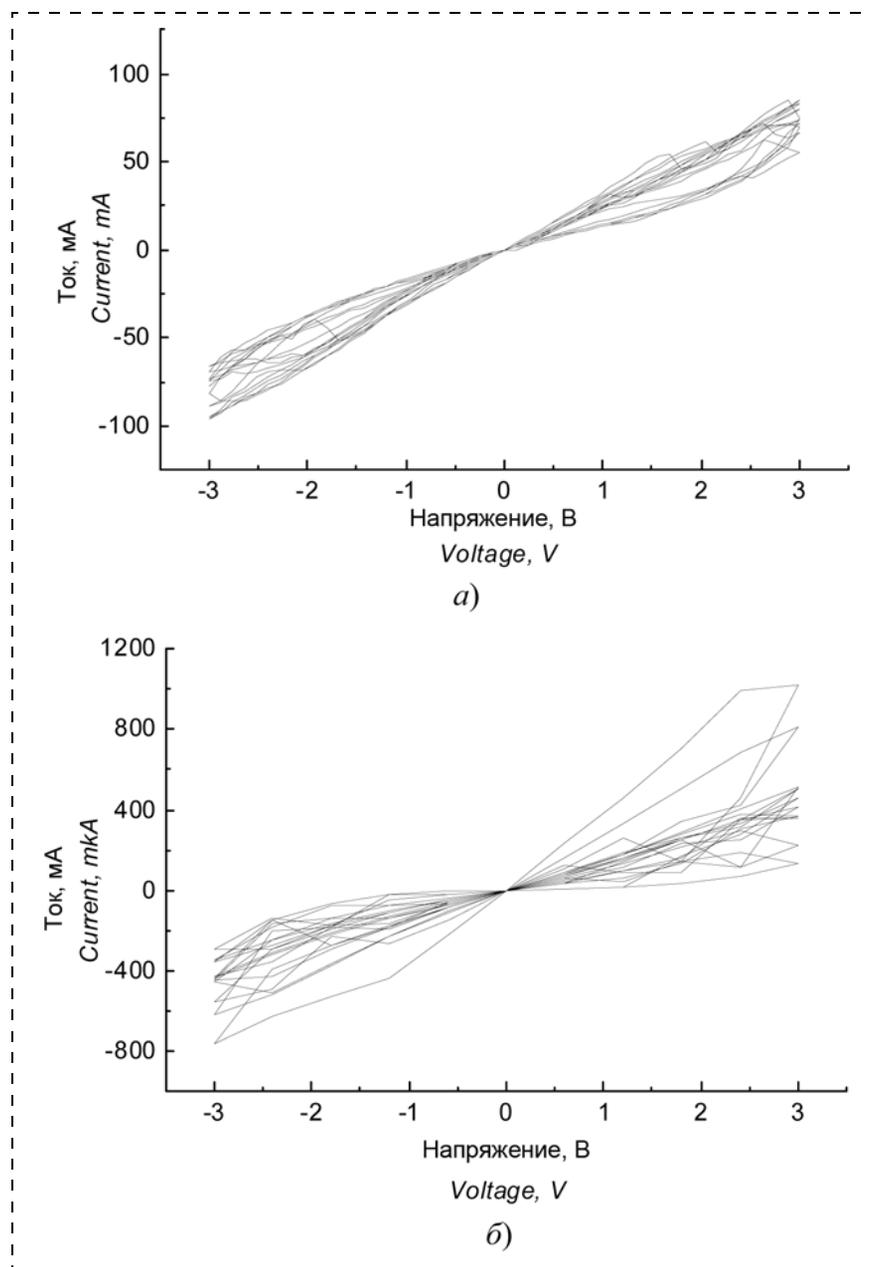


Рис. 3. Коллекция ВАХ первых 10 последовательных циклов работы *PMC* при частоте измерений:
а — 5 Гц; б — 20 Гц

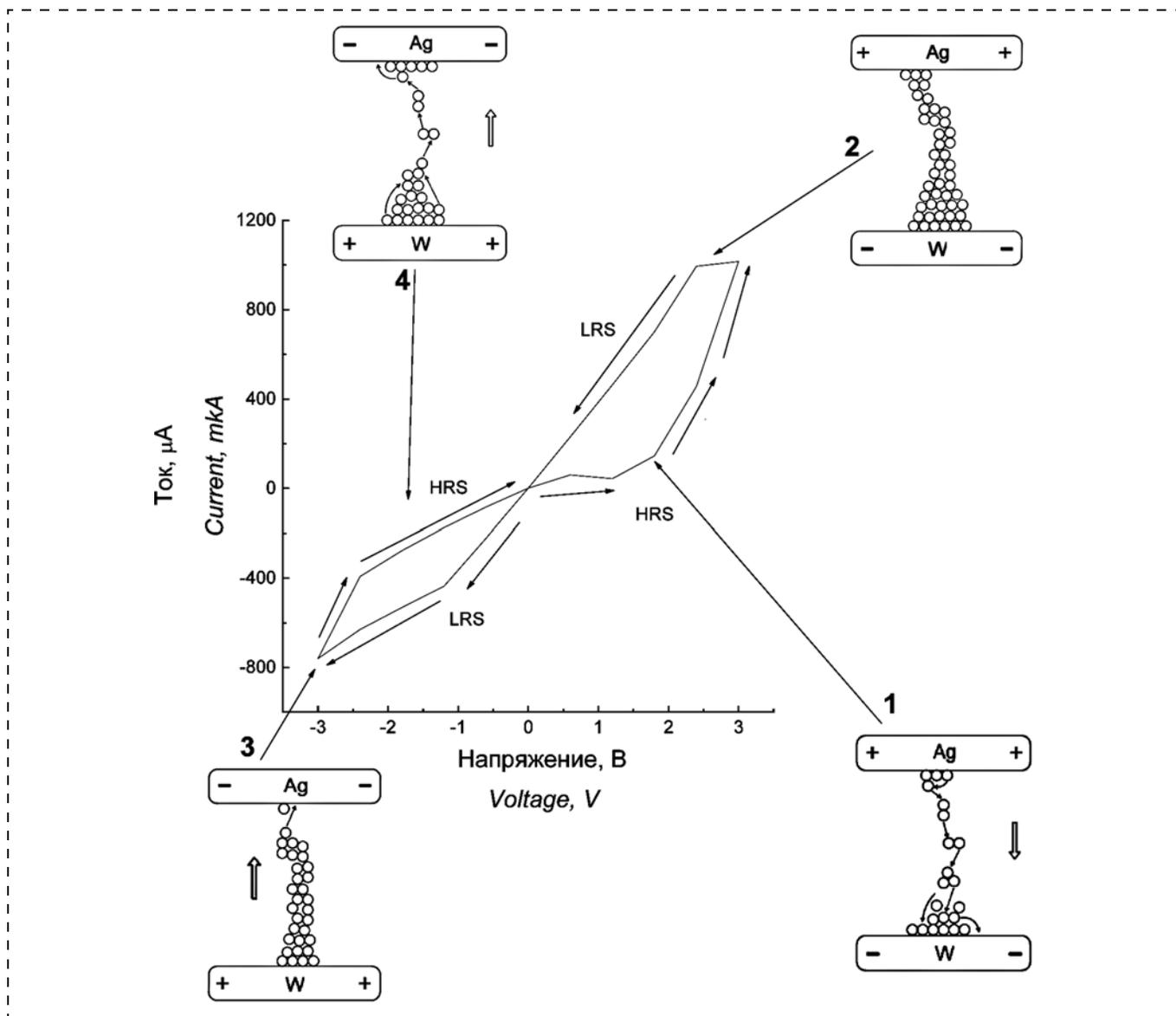


Рис. 4. ВАХ при стандартном режиме переключения *PMC*. На вставках показаны особенности морфологии нити, соответствующие данному участку ВАХ. Стрелками на вставках показано направление миграции ионов Ag^+ . Цифрами (по мере их возрастания) отмечено изменение морфологии нити во времени

емого сигнала, что свидетельствует об отсутствии каких-либо структурных изменений металлической нити в широком диапазоне изменения напряжения (рис. 5, вставка 1). Состоянию *HRS* соответствуют участки II и III подаваемого сигнала, причем на участке изменения напряжения от 1,5 до -1,5 В сопротивление резко возрастает. Дальнейшее изменение сопротивления (уменьшение) наблюдается в области от -1,5 до -3 В. Аналогичная ВАХ возникает при изменении порядка расположения электродов мемристора в пространстве, когда верхним электродом становится инертный электрод, а нижним — активный электрод [16].

Из ВАХ видно, что при отрицательном потенциале на *AE* также возможно формирование металлической нити за счет участия ионов Ag^+ , предварительно осевших (на стадии электрокристаллизации) на *CE* и сформировавших электрический осадок в предыдущем рабочем цикле. Участие в формировании металлической нити электролитического осадка обеспечивает то обстоятельство, что в условиях создания сильных электрических полей при амплитуде сигнала 3 В и достаточно высокой частоте генерации сигнала, равной 20 Гц, процесс электрокристаллизации ионов Ag^+ приобретает характер импульсного электроосаждения. Импульсное электроосаж-

дение [17] является технологическим приемом, используемым для получения металлического электроосадка высокой плотности. Например, приготовленные таким способом нанокристаллы обладают плотностью, приближающейся к плотности массивных тел [18]. Согласно исследованиям, выполненным в [19], приготовленный методом импульсного электроосаждения нанокристаллический никель имеет плотность 95,5 %. Такой уплотненный электролитический осадок характеризуется непрерывной поверхностью, обладает поверхностным натяжением и имеет такие же диффузионные свойства, как и у компактных массивных тел. В микрообъемах поверх-

ность уплотненного электролитического осадка искривлена вследствие неоднородности электрического поля и определенной хаотизации процесса электрокристаллизации. В массивном твердом теле, обладающем поверхностным натяжением, в области искривленной поверхности под действием лапласовых сил возникает поток поверхностной диффузии, стремящийся выровнять искривленную (вспученную) поверхность. Таким образом, в *PMC* под действием сил Лапласа происходит своего рода «растекание» электролитического осадка серебра по поверхности *W* электрода (рис. 5, вставка 2), которое в принципе может захватывать достаточно большую по пло-

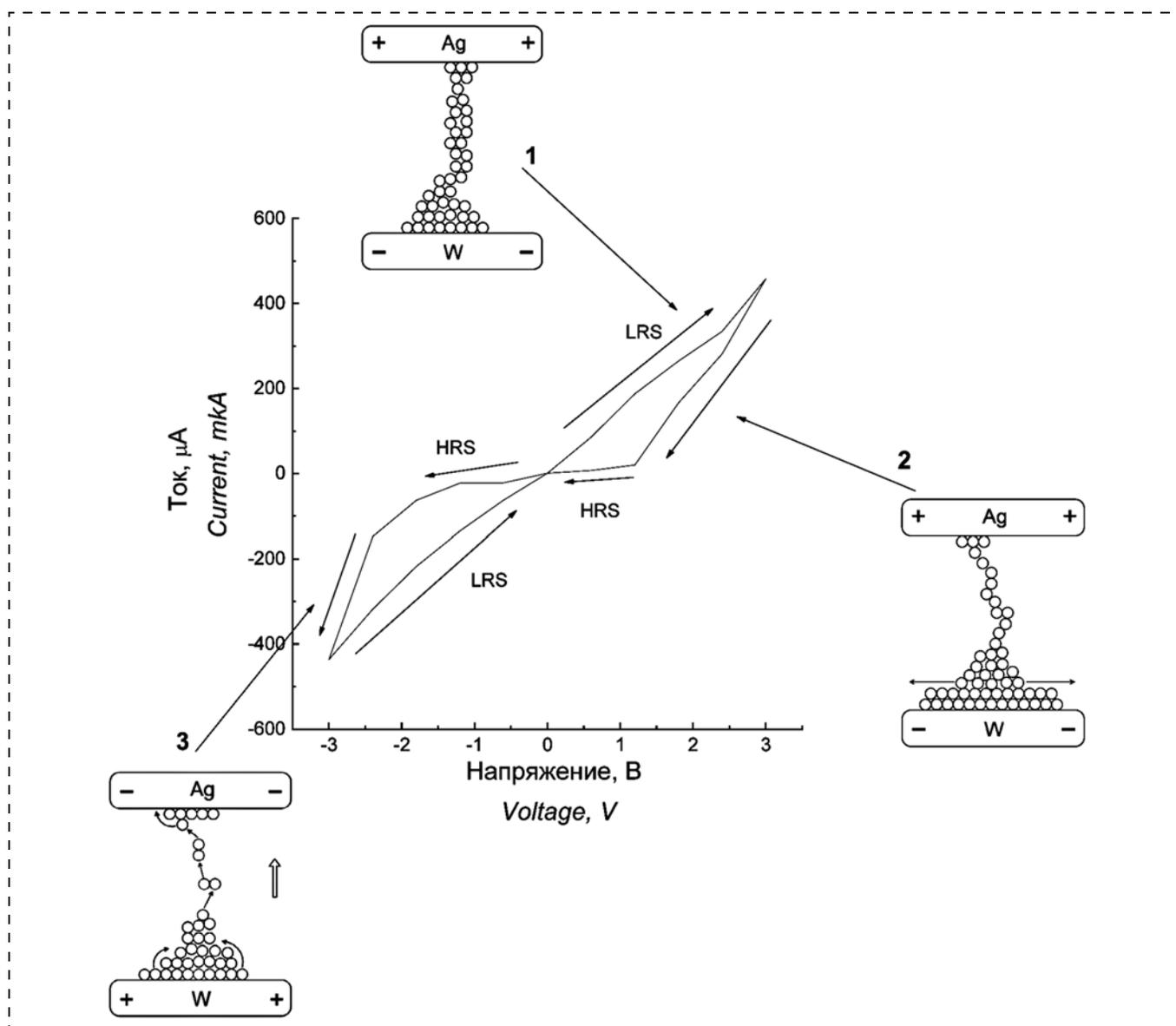


Рис. 5. ВАХ при измененном порядке режима переключения *PMC*. На вставках показаны особенности морфологии нити, соответствующие данному участку ВАХ. Стрелками на вставках показано направление миграции ионов Ag^+ . Цифрами (по мере их возрастания) отмечено изменение морфологии нити во времени

щади пространственную область. При «растекании» электролитического осадка по поверхности W электрода происходит его отравление, и в силу этого обстоятельства сопротивление цепи растёт. На отравление W электрода указывает также уменьшение интервала изменения рабочего тока PMS .

Из показанной на рис. 5 ВАХ видно, что на участке изменения напряжения от 1,5 до $-1,5$ В, как отмечалось ранее, значительно возрастает сопротивление. Уменьшение сопротивления происходит только при переходе в область отрицательных напряжений при превышении некоего порогового значения, равного $-1,5$ В. После превышения порогового напряжения происходит активное разрыхление осадка, а затем по мере увеличения отрицательного потенциала (при изменении напряжения от $-1,5$ до -3 В) — дальнейшая реорганизация морфологии металлической нити, которая идет по эстафетному механизму путем замещения одного осаждаемого на AE иона Ag^+ на другой (рис. 5, вставка 3). Участие в формировании токопроводящего канала электролитического осадка при подаче на AE отрицательного напряжения (в классической схеме формирования токопроводящего канала в PMS , описанной в работах [5, 6], при отрицательном напряжении происходит только разрушение канала) создает эффект переполюсовки электродов мемристора [16]. Переполюсовка электродов происходит, по-видимому, в области «мертвой» зоны при изменении напряжения от 1,5 до $-1,5$ В. Именно такой геометрии устройства мемристора — обращения в пространстве расположения активного и инертного электродов — соответствует, как отмечалось выше, ВАХ, приведенная на рис. 5.

Описанный режим работы мемристора является по сути деградационным, поскольку, как это хорошо видно из рис. 5, интервал изменения рабочего тока PMS постепенно сужается. При этом размываются понятия переключения режима работы мемристора SET и $RESET$. Что же касается электротехнических характеристик мемристора, то состояния мемристора ON (мемристор находится во включенном состоянии в режиме чтения) и OFF (мемристор выключен) соответствуют различным участкам подаваемого сигнала. Мемристор будет находиться в положении ON на участках I и IV подаваемого сигнала и в положении OFF на участках II и III подаваемого сигнала.

Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что при предельных режимах работы (частота генерации сигнала 20 Гц, амплитуда сигнала 3 В) мемристора на основе Ge_xSe_y твердого электролита, помимо предполагаемого классического режима работы, наблюдается также «обратный» режим работы, соответствующий переполюсовке электродов мемристора, когда в качестве верхнего электрода используется инертный электрод, а активный электрод заземлен. Наблюдаемый эффект можно объяснить образованием на инертном вольфрамовом электроде уплотненного электролитического осадка ионов Ag^+ , возникающего в результате импульсного режима подачи на активный электрод достаточно высокого, для наноразмерных объектов, положительного напряжения. Наличие плотного электролитического осадка, во-первых, увеличивает сопротивление системы, а во-вторых, позволяет провести формирование токопроводящего канала при отрицательном напряжении. При последующих рабочих циклах мемристора нормальный и «обратный» режимы работы чередуются попеременно, и, следовательно, мемристор на основе Ge_xSe_y твердых электролитов способен к самовосстановлению. При этом, однако, интервал рабочего тока мемристора сужается, что свидетельствует о протекании в мемристор деградационных процессов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-29-03003 МК).

Список литературы

1. Chua L. O. Memristor — missing circuit element // IEEE Trans. Circuit Theory CT-18. 1971. P. 507-519.
2. Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S. The missing memristor found // Nature. 2008 V. 453 P. 80—83.
3. Yang J. J., Strukov D. B., Stewart D. R. Memristive devices for computing // Nature Nanotechnology. 2013. Vol. 8. N 1. P. 13—24.
4. Guo X., Schindler C., Menzel S., Wasser R. Understanding the switching-off mechanism in Ag^+ migration based resistively switching model systems. Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91. P. 133513 (3 p.).
5. Waser R., Dittmann R., Staikov G., Szot K. Redox-based resistive switching memories — nanoionic mechanisms, prospects, and challenges // Advanced Materials. 2009. Vol. 21. P. 2632—2663.
6. Valov I., Waser R., Jameson J. R. Electrochemical metallization memories — fundamentals, metallization, prospects // Nanotechnology. 2011. Vol. 22. P. 254003 (22 p.).

7. **Mazumder P., Kang S. M., Waser R.** Memristors: devices, models and applications // Proc. IEEE. 2012. Vol. 100, N 6. P. 1911—1916.

8. **Eshraghian K., Kavehei O., Cho K.** et al. Memristive device fundamentals and modeling: applications to circuits and systems simulation // Proc. IEEE. 2012. Vol. 100, N. 6. P. 1991—2007.

9. **Бокштейн Б. С., Ярославцев А. Б.** Диффузия атомов и ионов в твердых телах. М.: Издательство МИСИС, 2005. 363 с.

10. **Strukov D. B., Williams R. S.** Exponential ionic drift: fast switching and low volatility of thin-film memristors // Appl. Phys. A. 2009. Vol. 94. P. 515—519.

11. **Waser R., Aono M.** Nanoionics-based resistive switching memories // Nature materials. 2007. Vol. 6. P. 833—840.

12. **Мурыгин И. В.** Электродные процессы в твердых электролитах. М.: Наука, 1991. 352 с.

13. **Дамаскин Б. Б., Петрий О. А.** Введение в электрохимическую кинетику. М.: Высшая школа, 1975. 416 с.

14. **Schindler C., Valov I., Waser R.** Faradaic currents during electroforming of resistively switching Ag—Ge—Se

type electrochemical metallization memory cell // Phys. Chem. Chem. Phys. 2009. Vol. 11. P. 5974—5979.

15. **Schindler C., Staikov G., Waser R.** Electrode kinetics of Cu—SiO₂-based resistive switching cells: overcoming voltage-time dilemma of electrochemical metallization memories // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94. P. 072109 (3 p.).

16. **Linn E., Rosezin R., Kugeler C., Waser R.** Complementary resistive switches for passive nanocrossbar memories // Nature materials. 2010. Vol. 9. P. 403—406.

17. **Toth-Kadar E., Bakonyi I., Pogany L., Cziraki A.** Microstructure and electrical transport properties of pulse-plated nanocrystalline nickel electrodeposits // Surface and Coating Technology. 1996. Vol. 88. P. 57—65.

18. **Erb U.** Electrodeposited nanocrystals: synthesis, properties and industrial application // NanoStructured Materials. 1995. Vol. 6. P. 533—538.

19. **Dalla Torre F., Van Swygenhoven H., Victoria M.** Nanocrystalline electrodeposited Ni: microstructure and tensile properties // Acta Materialia. 2002. Vol. 50. P. 3957—3970.

A. N. Aleshin, Dr. Sci., Chief Researcher, a.n.aleshin@mail.ru,

O. A. Ruban, Ph. D., Researcher, myx.05@mail.ru,

V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow, 117105, Russian Federation

Corresponding author:

Ruban Oleg A., Ph. D., Researcher, V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow, 117105, Russian Federation
E-mail: myx.05@mail.ru

Degradation Processes in Programmable Metallization Cell. Phenomenon and Reasons of it Appearance

Received on April 27, 2020

Accepted on April 30, 2020

Behavior peculiarities of memristors based on Ge_xSe_y solid electrolytes with Ag active and W inert electrodes have been studied under an ultimate regime of their work at two frequencies of a bi-polar triangle signal: 5 and 20 Hz. Ultimate regime was covered by using higher amplitude of the signal equal to 3 V. It was shown that at 20 Hz frequency the memristor demonstrates two regimes of their work: direct and backward regimes; the latter corresponds a changed geometry of electrodes arrangement, when an inert electrode used as an top electrode. It was shown that the backward regime is caused by a precipitate of silver ions formed on W inert electrode during pulsed electrodeposition which transforms a non-coherent deposit to solid one. The solidelectrodeposit participates in the formation of a current channel even during a negative voltage cycle of memristor operation. The possible mechanism of the current channel formation at the given conditions of electrolytic cell operation is discussed.

Keywords: memristor, programmable metallization cell, degradation, current channel, metallic filament, current-voltage curve, morphology

For citation:

Aleshin A. N., Ruban O. A. Degradation Processes in Programmable Metallization Cell. Phenomenon and Reasons of it Appearance, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 6, pp. 335—344.

DOI: 10.17587/nmst.22.335-344

References

1. **Chua L. O.** Memristor — missing circuit element, *IEEE Trans. Circuit Theory* CT-18, 1971, pp. 507—519.
2. **Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S.** The missing memristor found, *Nature*, 2008, vol. 453, pp. 80—83.
3. **Yang J. J., Strukov D. B., Stewart D. R.** Memristive devices for computing, *Nature Nanotechnology*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 13—24.
4. **Guo X., Schindler C., Menzel S., Wasser R.** Understanding the switching-off mechanism in Ag⁺ migration based resistively switching model systems, *Appl. Phys. Lett.*, 2007, vol. 91, pp. 133513 (3 p.).
5. **Waser R., Dittmann R., Staikov G., Szot K.** Redox-based resistive switching memories — nanoionic mechanisms, prospects, and challenges, *Advanced Materials*, 2009, vol. 21, pp. 2632—2663.
6. **Valov I., Waser R., Jameson J. R.** Electrochemical metallization memories — fundamentals, metallization, prospects, *Nanotechnology*, 2011, vol. 22, pp. 254003 (22 p.).
7. **Mazumder P., Kang S. M., Waser R.** Memristors: devices, models and applications, *Proc. IEEE*, 2012, vol. 100, no. 6, pp. 1911—1916.
8. **Eshraghian K., Kavehei O., Cho K.** et al. Memristive device fundamentals and modeling: applications to circuits and systems simulation, *Proc. IEEE*, 2012, vol. 100, no. 6, pp. 1991—2007.
9. **Bokshtejn B. S., Yaroslavcev A. B.** *Diffuziya atomov i ionov v tverdyx telax*. Moscow, Izdatel'stvo MISIS, 2005, 363 p. (in Russian).
10. **Strukov D. B., Williams R. S.** Exponential ionic drift: fast switching and low volatility of thin-film memristors, *Appl. Phys. A.*, 2009, vol. 94, pp. 515—519.
11. **Waser R., Aono M.** Nanoionics-based resistive switching memories, *Nature materials*, 2007, vol. 6, pp. 833—840.
12. **Murygin I. V.** *Elektrodnye processy v tverdyx elektrolitax*. Moscow, Nauka, 1991, 352 p. (in Russian).
13. **Damaskin B. B., Petrij O. A.** *Vvedenie v e'lektrokhimicheskuyu kinetiku*. Moscow, Vysshaya shkola, 1975, 416 p. (in Russian).
14. **Schindler C., Valov I., Waser R.** Faradaic currents during electroforming of resistively switching Ag—Ge—Se type electrochemical metallization memory cell, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2009, vol. 11, pp. 5974—5979.
15. **Schindler C., Staikov G., Waser R.** Electrode kinetics of Cu — SiO₂-based resistive switching cells: overcoming voltage-time dilemma of electrochemical metallization memories, *Appl. Phys. Lett.*, 2009, vol. 94, pp. 072109 (3 p.).
16. **Linn E., Rosezin R., Kugeler C., Wasser R.** Complementary resistive switches for passive nanocrossbar memories, *Nature materials*, 2010, vol. 9, pp. 403—406.
17. **Toth-Kadar E., Bakonyi I., Pogany L., Cziraki A.** Microstructure and electrical transport properties of pulse-plated nanocrystalline nickel electrodeposits, *Surface and Coating Technology*, 1996, vol. 88, pp. 57—65.
18. **Erb U.** Electrodeposited nanocrystals: synthesis, properties and industrial application, *NanoStructured Materials*, 1995, vol. 6, pp. 533—538.
19. **Dalla Torre F., Van Swygenhoven H., Victoria M.** Nanocrystalline electrodeposited Ni: microstructure and tensile properties, *Acta Materialia*, 2002, vol. 50, pp. 3957—3970.

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Технический редактор Т. А. Шацкая. Корректор Е. В. Комиссарова.

Сдано в набор 25.04.2020. Подписано в печать 24.05.2020. Формат 60×88 1/8. Заказ МС620. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье А. М. Темнова

«ГИБРИДНО-МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СВЧ НА АЛМАЗЕ»

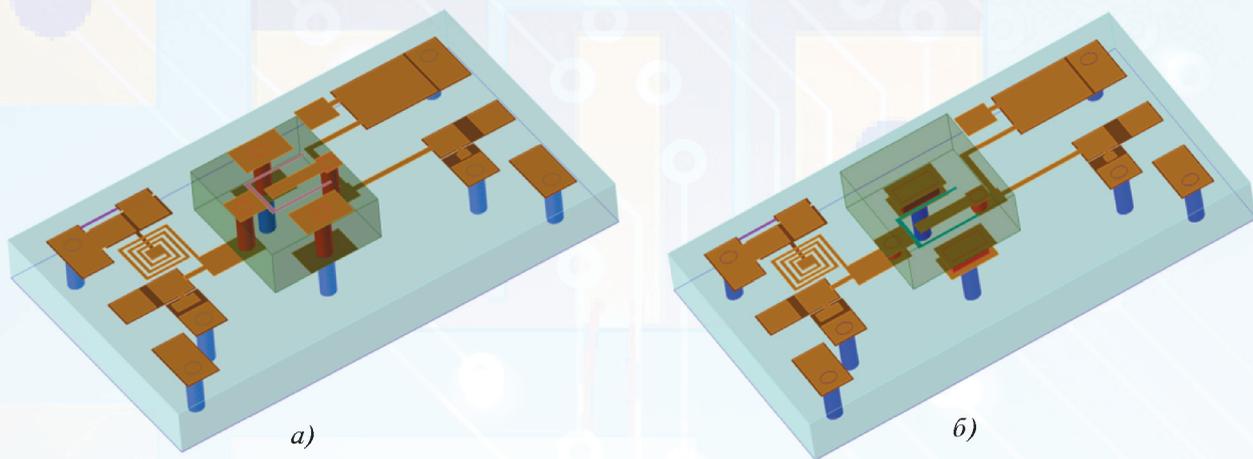


Рис. 3. Конструкция ГМИС СВЧ с кристаллами поверхностного монтажа:
a – SMD-транзистор на плате ГМИС СВЧ; *б* – FMD-транзистор на плате ГМИС СВЧ
(патенты РФ № 244224, № 2258330, № 2194337)



Вид снизу

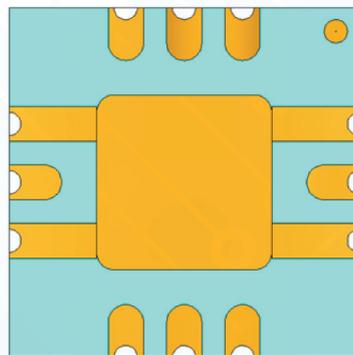
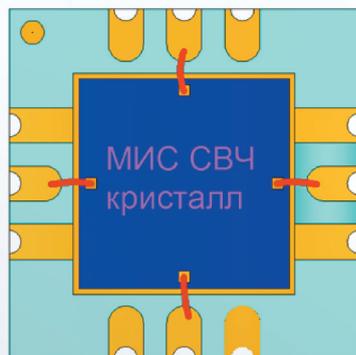


Рис. 4. Конструкция ГМИС СВЧ-SMD с алмазным основанием и объемной алмазной крышкой из ПАП

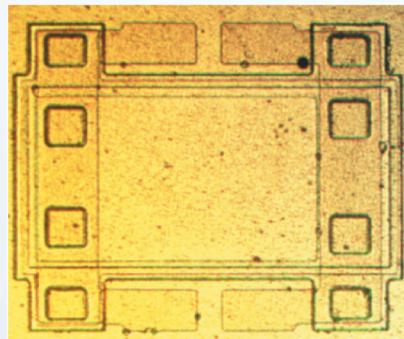
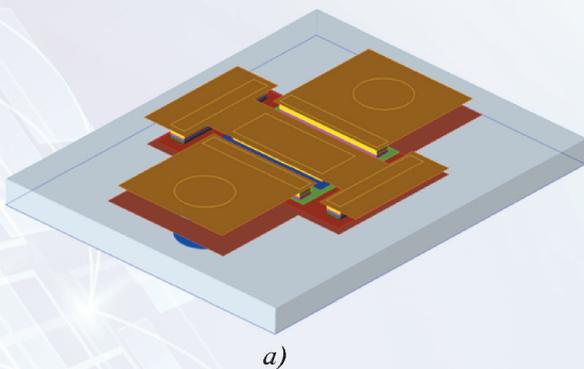


Рис. 10. Конструкция четырехобкладочного конденсатора:
a – проект; *б* – практический конденсатор

Рисунки к статье А. М. Темнова
 «ГИБРИДНО-МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СВЧ НА АЛМАЗЕ»

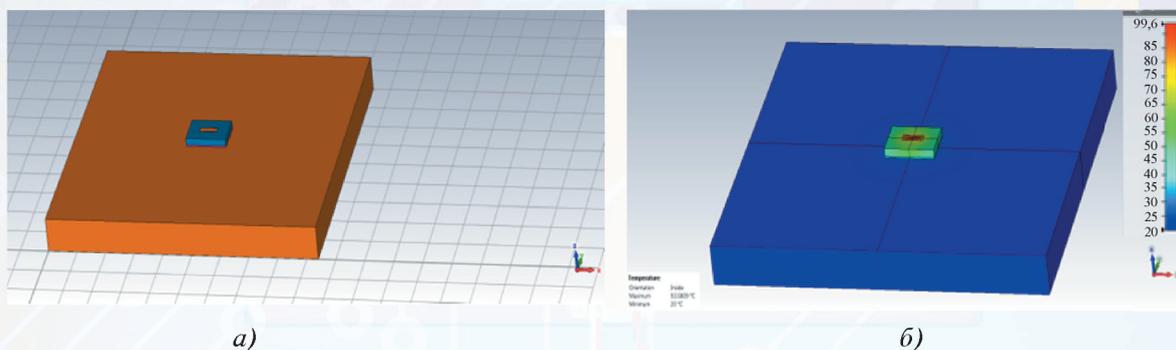


Рис. 31. Кристалл GaAs или GaN ПТШ размещен непосредственно на медном основании (а);
 градиент температуры GaN ПТШ на подложке SiC (б)

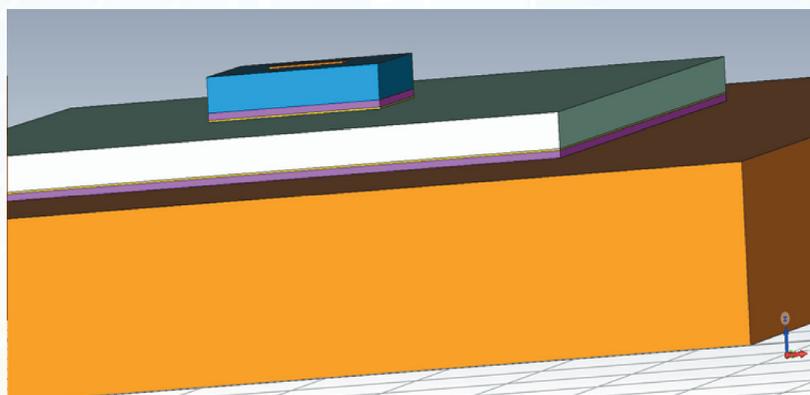


Рис. 32. Кристалл GaAs или GaN ПТШ приклеен к алмазной плате из ПАИП,
 а алмазная плата приклеена к медному основанию

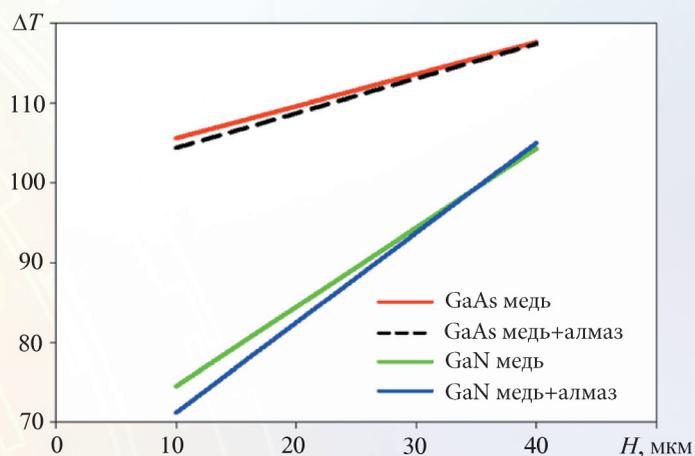


Рис. 33. Результаты измерений усилителя [20]:
 а – малосигнальные S-параметры при напряжении питания 10 В; б – измерения мощности в непрерывном режиме при напряжении питания 12 В на частоте 94 ГГц