

ISSN 1813-8586

НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

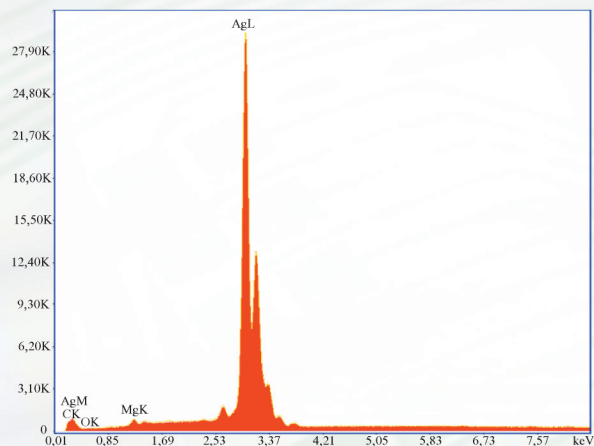
- Нанотехнологии
- Зондовая микроскопия
- Микромашины и наносистемы
- Молекулярная электроника
- Биоактивные нанотехнологии
- Элементы датчиков и биочипы
- Микроэлектромеханические системы
- Микрооптоэлектромеханические системы
- Биомикроэлектромеханические системы

Том 24. № 3. 2022



Рисунок к статье О. С. Бохова,
В. В. Лучинина, П. В. Афанасьева,
В. А. Старцева, И. В. Мандрика
«ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ
ГИБКИХ КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ
ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
КАПЛЕСТРУЙНОЙ ПЕЧАТИ»

Рис. 2. Спектры отожженных (желтый) и не отожженных (красный) токопроводящих чернил



Рисунки к статье О. Е. Глухой, М. М. Слепченкова, А. А. Петрунина
«МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИТНОГО
3D-НАНОМАТЕРИАЛА С ТОПОЛОГИЕЙ ОСТРОВКОВОГО ТИПА»

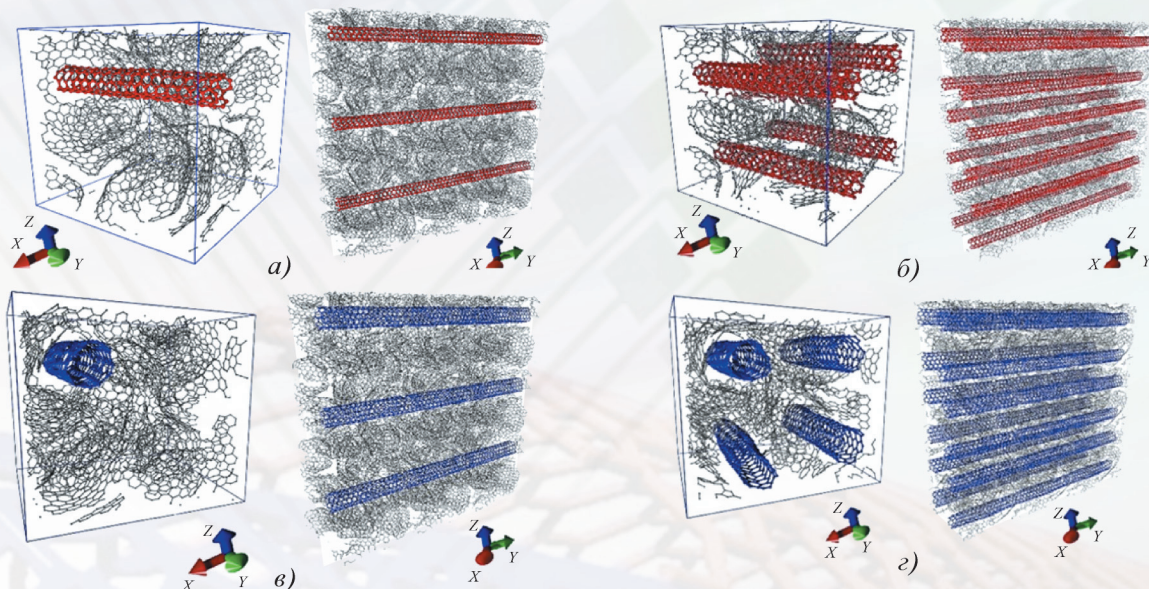


Рис. 1. Атомистические модели суперячейки и фрагмента 3D-наноматериала:

a – с одной трубкой (4,4); *b* – с четырьмя трубками (4,4); *c* – с одной трубкой (6,5); *d* – с четырьмя трубками (6,5)

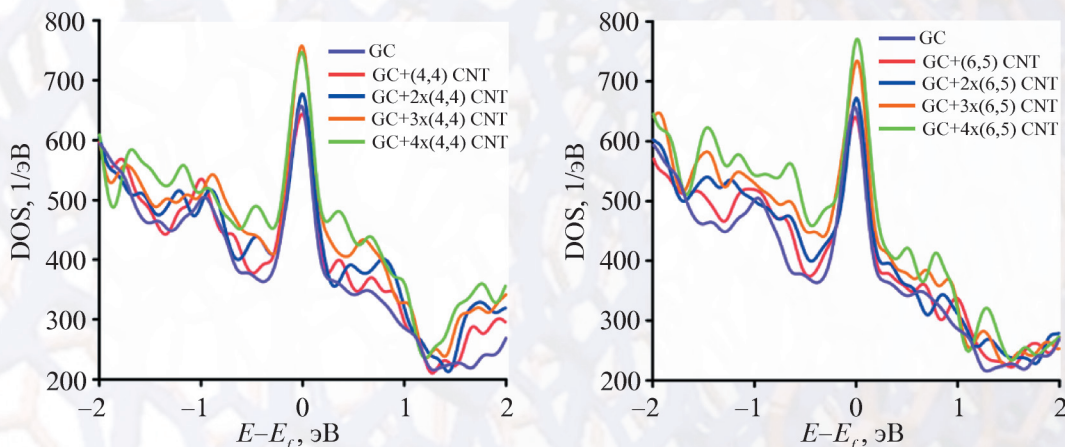


Рис. 3. Распределения плотности электронных состояний композитного 3D-наноматериала на основе ОУНТ (4,4) (слева) и ОУНТ (6,5) (справа) при увеличении числа трубок (фиолетовая линия – без трубок). По оси абсцисс отложена разность энергии электронов в кристалле E и энергии Ферми E_f

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 24. № 3 ✧ 2022

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 научной специальности 1.4.15. Химия твердого тела и в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным специальностям 1.3.11. Физика полупроводников и 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

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

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

Лабунов 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.

Пожеда 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., проф.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н., доц.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Чугунова А. В. (науч. ред.)

Шетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Бохов О. С., Лучинин В. В., Афанасьев П. В., Старцев В. А., Мандрик И. В. Формирование многослойных гибких коммутационных плат по аддитивной технологии каплеструйной печати 111

Глухова О. Е., Слепченко М. М., Петрунин А. А. Механические и электронные свойства углеродного композитного 3D-наноматериала с топологией островкового типа 117

Беспалов В. А., Гусев Е. Э., Дюжев Н. А., Иванин П. С., Махиборода М. А. Обзор существующих методов микросборки 124

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Сарапульцев Д. А., Золоторев А. А., Цареградская М. Л. Анализ и макетирование направленного ответвителя СВЧ диапазона частот как SMD-компонента 137

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Тестов О. А., Гареев К. Г., Лучинин В. В., Комлев А. Е., Тестов Д. О., Тестов И. О., Хмельницкий И. К. Конформная интегрируемая микро- и наноконпозиционная пассивная электромагнитная защита объектов биотехносферы 143

Макарова Е. Е., Амеличев В. В., Костюк Д. В., Васильев Д. В., Казаков Ю. В., Орлов Е. П. Исследование тестовых ячеек энергонезависимой магниторезистивной памяти 154

Садков В. Д., Пилькевич А. В. Малогабаритные поглощающие элементы адаптаттенуаторов для поверхностного монтажа 159

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. 8(499) 270-16-52)

Адрес для переписки:

107076, Москва,
ул. Матросская Тишина,
д. 23, стр. 2, оф. 45
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. 24

No. 3

2022

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
 Kuljchin Yu. N., 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.
 Singh K., PhD (India)
 Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 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

Bokhov O. S., Luchinin V. V., Afanasev P. V., Startsev V. A., Mandrik I. V. Flexible Multi-Layer Circuit Boards Manufacturing using Additive Technology of Inkjet Printing 111

Glukhova O. E., Slepchenkov M. M., Petrunin A. A. Mechanical and Electronic Properties of a Carbon Composite 3D Nanomaterial with an Island-Type Topology 117

Bespalov V. A., Gusev E. E., Djuzhev N. A., Ivanin P. S., Makhboroda M. A. Review of Existing Microassembly Methods 124

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Sarapultsev D. A., Zolotorev A. A., Tsoregradskaya M. L. Analysis and Modeling of a Directional Microwave Coupler as SMD Component 137

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Testov O. A., Gareev K. G., Komlev A. E., Luchinin V. V., Testov D. O., Testov I. O., Khmelniyskiy I. K. Conformal Integrated Micro- and Nanocomposite Passive Electromagnetic Protection of Biotechnology Objects 143

Makarova E. E., Amelichev V. V., Kostyuk D. V., Vasilyev D. V., Kazakov Y. V., Orlov E. P. Research of Test Cells of Power-independent Magnetoresistive Memory 154

Sadkov V. D., Pilkevich A. V. Small-Sized Absorbing Elements of Adaptol Attenuators for Surface Mounting 159

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

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

УДК 621.3

DOI: 10.17587/nmst.23.111-117

О. С. Бохов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **В. В. Лучинин**, д-р техн. наук, директор ИЦ ЦМИД, cmid_leti@mail.ru, **П. В. Афанасьев**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **В. А. Старцев**, инженер, **И. В. Мандрик**, инженер
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ГИБКИХ КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ КАПЛЕСТРУЙНОЙ ПЕЧАТИ

Поступила в редакцию 30.08.2021

Представлена технология каплеструйной печати для формирования многослойных гибких коммутационных плат. Технология обеспечивает улучшение эргономики окружающих человека электронных устройств, позволяя создавать изделия нового поколения: "умную одежду", "интеллектуальную кожу" и "Лаборатории на чипе". Одним из основных преимуществ и особенностей гибкой печатной электроники является возможность использования органических полимеров в качестве материала подложки, обеспечивающих конформную гибридную интеграцию.

Ключевые слова: каплеструйная печать, наночастицы, печатная электроника, многослойная коммутация, конформность, гибридная интеграция

Введение

Технология каплеструйной печати занимает особое место среди остальных способов формирования многослойных топологических композиций, так как в отличие от большинства процессов она является бесшаблонной. Кроме того, это аддитивная технология, позволяющая формировать слои с использованием широкого спектра материалов с приемлемым разрешением и воспроизводимостью электрофизических параметров. Использование изображения в цифровом формате для управления процессом каплеструйной печати дает возможность вносить изменения в топологию изделия и таким образом реализовать итеративный подход к разработке и прототипированию изделий.

Целью данной работы является представление результатов экспериментальных исследований, направленных на разработку технологии формирования многослойных гибких односторонних и двусторонних печатных плат методом каплеструйной печати.

В лаборатории гибкой печатной электроники Инжинирингового центра микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ "ЛЭТИ" при разработке технологии каплеструйного формирования гибких многослойных коммутационных плат использовалась лабораторная установка LP50 (рис. 1) производства компании PixDro (Нидерланды). Особенностью данной аппаратуры является возможность



Рис. 1. Установка каплеструйного нанесения PixDro LP50

быстрой смены чернил за счет установки печатающей головы в специализированную быстросъемную сборку, также ее преимуществом является широкий спектр доступных опций с возможностью регулировки всех ключевых технологических параметров, включая форму управляющего сигнала.

Для формирования токопроводящих слоев были выбраны чернила на основе наночастиц в растворителе. Наноразмерные частицы увеличивают отношение площади поверхности к объему, кроме того уменьшается время, необходимое для спекания. В то же время наночастицы склонны к образованию агломератов, что приводит к необходимости их защиты диспергатором или полимерной оболочкой вокруг наночастиц для увеличения стабильности композиции. Наблюдается также эффект "кофейного пятна", который состоит в неравномерности нанесения материала по площади вследствие перераспределения частиц в процессе высыхания растворителя. Среди всех доступных чернил на основе наночастиц были выбраны серебряные чернила, так как они менее подвержены окислению по сравнению с чернилами на основе наночастиц алюминия или меди.

Недостатком чернил на основе наночастиц является необходимость отжига полученных слоев для спекания и получения структур с необходимой проводимостью, но разработка чернил с меньшими температурами спекания позволила использовать их с различными типами низкотемпературных подложек, таких как полиэтилентерефталат (ПЭТ) или полиэтиленнафталат (ПЭН).

В рамках данного исследования в качестве материала подложки использовали ПЭН-пленку толщиной 125 мкм с клеевым слоем для ламинирования к жесткому временному носителю, выдерживающую нагрев до температур, не превышающих 165 °С, в связи с чем были выбраны чернила с тем-

пературой отжига 150 °С (см. таблицу). Данные чернила представляют собой наночастицы серебра диаметром 50...120 нм, помещенные в растворитель (монометиловый эфир триэтиленгликоля) в соотношении 1:1 (по массе).

Выбранный материал был протестирован на совместимость с ПЭН-подложкой, для этого нанесенные структуры отжигали в конвекционной печи при 150 °С в течение 30 мин, что соответствует рекомендованному производителем режиму, после чего визуальный осмотр подложки не выявил видимых изменений в ее структуре. Кроме того, был проведен рентгеноспектральный микроанализ (рис. 2, см. вторую сторону обложки), который показал увеличение массовой доли серебра в структуре (с 87 до 92 %) за счет уменьшения массовой доли углерода и кислорода (с 6 до 10 %).

Каплетруйная печать токопроводящих слоев

Для создания многослойной коммутационной платы по каплетруйной технологии необходимо разработать процессы печатного формирования токопроводящих и диэлектрических слоев, а также обеспечить межслоевые переходы. Разработка процесса каплетруйной печати состоит из нескольких основных этапов: подбор параметров каплеобразования; определение оптимальных параметров формирования слоя и топологических возможностей процесса; определение электрофизических параметров слоя.

Подбор параметров каплеобразования, к которым относятся температура печатающей головы, форма управляющего сигнала и "подтягивающее" давление, проводят с использованием встроенного функционала варьирования параметров *Advanced Drop Analysis*. Данный программный модуль позволяет получить набор стробоскопических изображений сгенерированной капли в условиях изменения

Параметры рассматриваемых токопроводящих материалов

Параметры	Токопроводящие				Диэлектрические
	Чернила 1	Чернила 2	Чернила 3	Чернила 4	
Растворитель/основной компонент	Монометил эфир трипропиленгликоль	Монометил эфир триэтиленгликоль	Монометил эфир триэтиленгликоль	2фенокси-этанол, пирролидон	1,4-бутандиол диакрилат
Массовая доля, %	50	50	50	19	50...70
Размер частицы, нм	50...70 90...115	50...85 90...120	50...80 90...120	100	—
Плотность, г/мл	1,77	1,90	1,93	1,3	1,05
Вязкость, сПз	24	34	37	12...18	10...16
Поверхностное натяжение, мН/м	28	30	33	39...42	37,5
Параметры отверждения	Отжиг 230 °С, 60 мин	Отжиг 150 °С, 30 мин	Отжиг 150 °С, 30 мин	Отжиг 150 °С, 30 мин	УФ-отверждение 389... 390 нм 0,5...1 Дж/см ²
Электрические параметры	22 мОм/□ (1...5 мкм)	30 мОм/□ (3,5 мкм)	20 мОм/□ (4 мкм)	< 100 мОм/□ (1 мкм)	ε = 2,3 (измеренное значение)

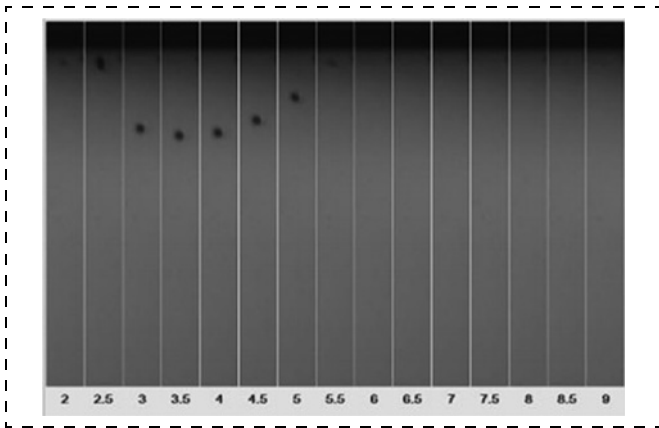


Рис. 3. Набор изображений капли при варьировании параметров каплеобразования

одного из технологических параметров с фиксированным шагом в заданном диапазоне значений, при этом все остальные параметры остаются неизменными. На рис. 3 представлен полученный массив изображений при варьировании длительности импульса от 2 до 9 мкс с шагом 0,5 мкс, из которого видно, что оптимальная длительность импульса — 3,5 мкс.

После подбора оптимальных параметров каплеобразования проводят тестирование стабильности генерации, которое включает частотную стабильность и воспроизводимость генерации после простоя печатающей головы. Проверка частотной стабильности заключается в тестировании процесса при частотах формирования капель до 10 кГц. Данный тест необходим для симулирования реального процесса печати, когда печатающая голова проходит над подложкой со скоростью до 100 мм/с, но при этом необходимо обеспечить разрешение печати до 1441 dpi. Проверка перезапуска после простоя важна, так как при выполнении технологического процесса установка останавливает генерацию капель на время расчета числа проходов и последовательности импульсов генерации по шаблону. После завершения расчетов запускается процесс печати, но образующаяся пауза может быть значительной при печати слоев большой площади.

Получив стабильный процесс каплеобразования, можно переходить к определению следующих оптимальных параметров формирования слоя, таких как: разрешение печати, температура стола и параметр "фактор качества", определяющий число сопел, используемое для печати линии. Разрешение печати (рис. 4) определяет значение перекрытия капель при печати, а следовательно, сплошность формируемого слоя. Температура стола и фактор качества влияют на растекание чернил после их нанесения.

Сплошной слой с незначительным количеством дефектов формируется при печати с разрешением 1080 dpi, а при разрешении 1441 dpi наблюдается слой с однородной поверхностью, но при этом присутствует некоторая неровность края ввиду чрезмерного растекания чернил. Данная неровность была устранена увеличением температуры стола до 80 °С, а также повышением фактора качества до 4. В итоге был получен слой, изображение которого представлено на рис. 5.

Топологические возможности разработанного процесса печати исследовали посредством печати встречно-штыревых структур с различной шириной линии и значением зазора. При этом было установлено, что разработанный процесс позволяет устойчиво формировать топологии с минимальной шириной линии 50 мкм и минимальным зазором 50 мкм. В этом случае возникающие дефекты, вызванные растеканием чернил или неравномерностью поверхности подложки, не приводят к потере функциональности.

Далее, так как разрабатываемый процесс предназначен для формирования коммутационных слоев, то определяли удельное сопротивление слоя и его толщину. Определение толщины структуры проводили с использованием профилометра Bruker Dektak X, для чего были напечатаны линии с разным числом печатных слоев: от 1 до 6. Результаты измерения (до аппроксимации) представлены на рис. 6.

С увеличением числа слоев толщина структуры увеличивается в среднем на 0,4 мкм. Для образца, состоящего из шести печатных слоев, была полу-

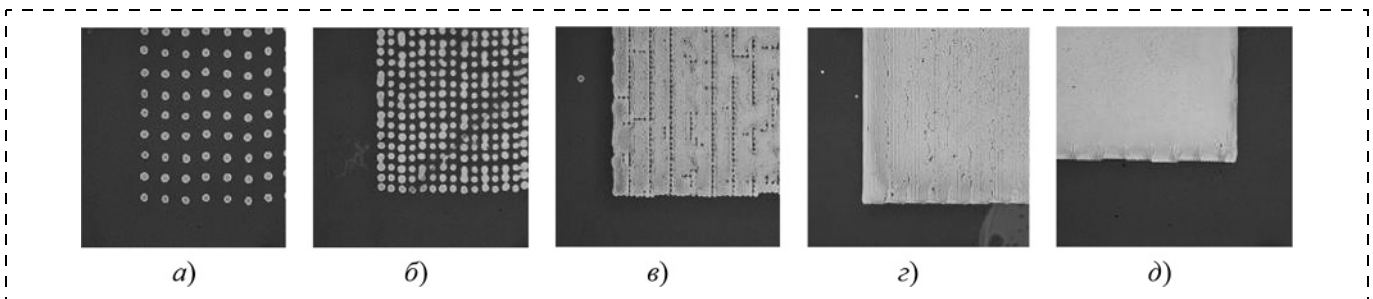


Рис. 4. Квадрат, напечатанный с различным разрешением печати:
a — 180 dpi; *б* — 360 dpi; *в* — 720 dpi; *г* — 1080 dpi, *д* — 1441 dpi

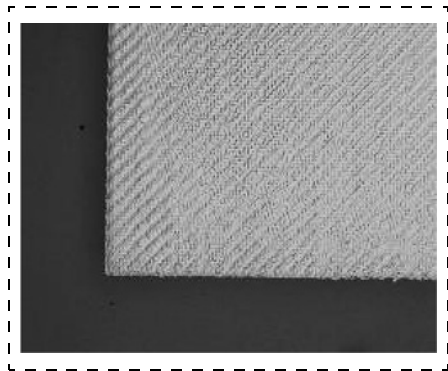


Рис. 5. Токпроводящий слой, напечатанный с разрешением 1441 dpi при температуре стола 80 °С и факторе качества QF4

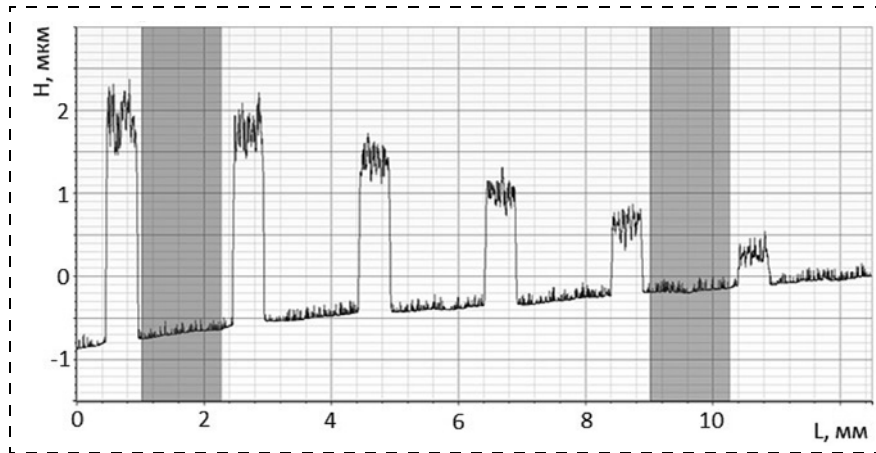


Рис. 6. Профиль образца до аппроксимации

чена толщина в 2,5 мкм, которая была также верифицирована препарированием слоя сфокусированным ионным пучком (рис. 7).

Электрическое тестирование проводили четырехзондовым методом. При этом измерения показали сопротивление квадрата 60 мОм/□ для структуры из шести слоев и 40 мОм/□ для структуры из восьми слоев, что является достаточным для формирования коммутационных слоев.

Каплетруйная печать диэлектрических слоев

В качестве материала диэлектрика был выбран фотоотверждаемый полимер на основе акрилатов, как материал, совместимый с используемыми токопроводящими чернилами. Технология печати диэлектрическими чернилами была разработана аналогичным образом. Так же как и для серебро-содержащих чернил были найдены параметры каплеобразования, а затем определены параметры формирования слоя, но в данном случае учитывали отверждение материала УФ-излучением. Засветку можно проводить после каждого прохода печати и в этом случае растекание чернил минимально, но образуется шероховатая структура с ярко выраженным рельефом, повторяющим проходы печати (рис. 8, а). Альтернативным вариантом является отверждение по окончании печати, таким образом получается слой с гладкой поверхностью, но при этом наблюдается сильное растекание чернил (рис. 8, б). Для формирования диэлектрика межслойной изоляции был выбран комбинированный подход (рис. 8, в): наносят два печатных слоя, при этом нижний слой отверждается каждый проход печати, а верхний — каждый 16-й проход. Нижний слой ограничивает растекание верхнего слоя, а верхний слой сглаживает рельеф поверхности.

Для диэлектрических слоев также была проведена профилометрия (рис. 9), при этом измерения выполняли для структур, отвержденных различным образом. Было определено, что толщина одного

печатного слоя составляет около 10 мкм. Кроме того было подтверждено наличие существенной шероховатости поверхности при отверждении слоя после каждого прохода печати, которая в среднем составляла 6 мкм.

Разработанная технология каплетруйного нанесения диэлектрика с использованием комбинированного подхода позволяет воспроизводимо формировать сплошные слои межслойной изоляции, что в сочетании с разработанной ранее технологией каплетруйного нанесения токопроводящих слоев позволяет создавать многослойные коммутационные платы.

Формирование многослойных коммутационных плат

Изготовление многослойных коммутационных плат помимо технологий нанесения токопроводящих и диэлектрических слоев подразумевает также процесс формирования межслойных переходных отверстий. При использовании технологии каплетруйной печати для изготовления платы существ-

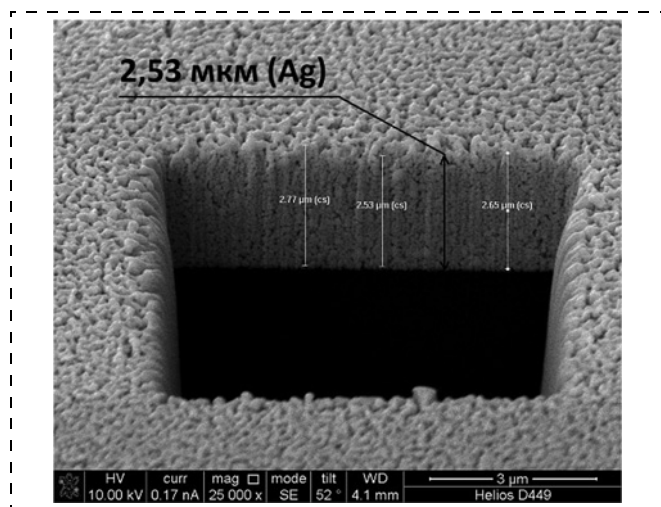


Рис. 7. Срез структуры из шести печатных слоев серебра

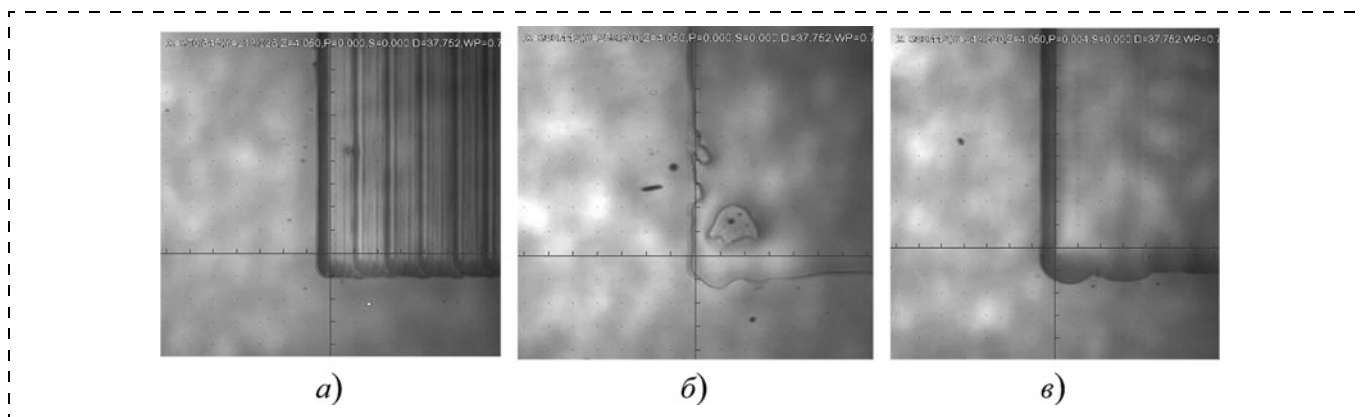


Рис. 8. Печатные диэлектрические структуры:

a — отверждение после каждого прохода печати; *б* — отверждение после окончания печати; *в* — комбинированный подход

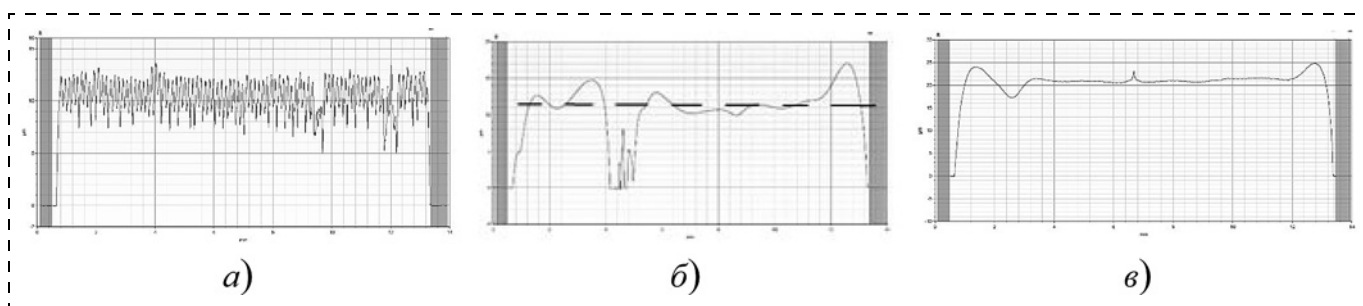


Рис. 9. Профилометрия диэлектрических структур:

a — отверждение каждый проход печати; *б* — отверждение по окончании печати; *в* — комбинированный подход

вуют два типа переходных отверстий: между печатными слоями с одной стороны подложки, которые формируются в диэлектрике изоляции в процессе нанесения слоя, и с одной стороны подложки на другую, которые выполняют сверлением или лазерной перфорацией подложки.

Переходные отверстия между слоями коммутации с одной стороны подложки закладывают в файл изготовления межслойной изоляции на этапе проектирования и формируют путем создания окон в диэлектрическом слое. При этом объем переходного отверстия дополнительно не заполняют проводящим материалом, а электрическое соединение достигается в процессе нанесения верхнего слоя металлизации. Диэлектрический слой образует плавную границу по краю переходного отверстия за счет растекания, что приводит к возможности осуществления коммутации без разрыва при печати верхнего проводящего слоя (рис. 10).

С учетом возможности осуществлять межслойную коммуникацию, используя сформированные в слое диэлектрика окна, полученная технология позволила создавать многослойные платы со следующими характеристиками:

- число слоев коммутации — до 8 (для двусторонних плат);
- минимальная ширина линии — 50 мкм;

- минимальный зазор между линиями — 50 мкм;
- минимальный диаметр формируемых окон — 200 мкм;
- поверхностное сопротивление токопроводящего слоя — 40 мОм/кв.

Для изготовленных тестовых коммутационных плат проводили деградационные тесты, включая измерение параметров в климатической камере при повышенных и пониженных температурах, ис-

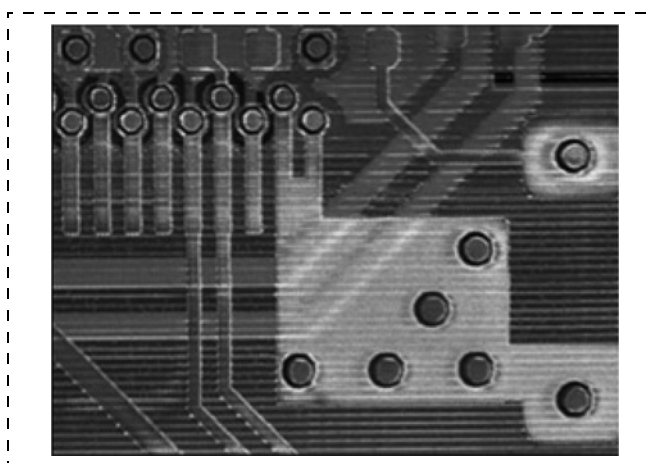


Рис. 10. Фрагмент напечатанной гибкой коммутационной платы с межслойными коммутационными отверстиями

пытания на вибрационном стенде и испытания на трехточечный изгиб. Тесты показали надежность коммутационных плат, изготовленных по технологии капле струйной печати.

Заключение

Технология капле струйной печати может быть эффективно использована для создания многослойных гибких коммутационных плат, при этом за счет применения преимуществ технологии, таких как низкотемпературность нанесения, аддитивность и конформность, возможно формирование плат на гибких органических подложках малой стоимости, таких как ПЭН. Стремительное развитие технологии капле струйной печати и коммерчески доступных материалов позволяет рассчитывать на дальнейшее уменьшение топологической нормы с увеличением качества коммутационных слоев.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 21-19-00719.

Список литературы

1. Лучинин В. В. Мультидисциплинарные технологии. Гибкая электроника и фотоника // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 12 (161). С. 2–6.
2. Лучинин В. В., Бохов О. С., Афанасьев П. В., Мандрик И. В., Старцев В. А., Смирнов А. В., Никонова В. А. Гибкая печатная конформная электроника. Отечественные компетенции и электронные компоненты // Наноиндустрия. 2019. Т. 12, № 6 (92). С. 342–350.

3. Бохов О. С., Афанасьев П. В. Электрогидродинамический способ печати наноразмерных 2D- и 3D-структур // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 8. С. 475–478.
4. Bochov O., Afanasev P., Grooten M., Henk van Broekhuizen, Startsev V., Mandrik I., Nikonova V., Smirnov A. Super inkjet technology machine development for additive 3D Manufacturing // International Scientific Journal "Industry 4.0". 2019. P. 175–178.
5. Афанасьев П. В., Бохов О. С., Мандрик И. В., Старцев В. А. Капле струйная технология гибкой печатной электроники для изготовления пассивных элементов // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 8. С. 465–468.
6. Топталов С. И., Устинов Е. М., Афанасьев П. В., Бохов О. С., Мандрик И. В., Старцев В. А. Создание антенных печатных модулей капле струйной технологией // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 8. С. 470–473.
7. Бороденков Н. И., Бохов О. С., Смирнов А. В., Шилков В. М. Разработка программных средств для проектирования и создания устройств гибкой печатной электроники // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 8. С. 459–462.
8. Афанасьев П. В., Бохов О. С., Лучинин В. В. Научно-технологический комплекс экспресс-прототипирования изделий гибкой электроники и фотоники // Наноиндустрия. 2013. № 6 (44). С. 94–104.
9. Лучинин В. В. Российский пилотный проект инженерингового центра "Гибкая печатная электроника и фотоника" // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 8. С. 451–455.
10. Лучинин В. В. Индустрия микро- и наносистем: от импортозамещения к технологическому суверенитету // Наноиндустрия. 2018. Т. 11, № 6 (85). С. 450–461.
11. Лучинин В. В., Бохов О. С., Мандрик И. В., Старцев В. А. и др. Конформно интегрируемая электронная компонентная база гибкой печатной электроники для Интернета людей // Электроника НТБ. 2020. № 5 (00196). С. 82–88.

O. S. Bokhov, Ph. D., Senior Researcher, **V. V. Luchinin**, D. Sc., Director of IC CMID, cmid_leti@mail.ru, **P. V. Afanasev**, Ph. D., Senior Researcher, **V. A. Startsev**, engineer, **I. V. Mandrik**, engineer
St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin), St-Petersburg, Russian Federation

Corresponding author:

Luchinin Victor V., D. Sc., Director of IC CMID, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin), St-Petersburg, 197376, Russian Federation
cmid_leti@mail.ru

Flexible Multi-Layer Circuit Boards Manufacturing using Additive Technology of Inkjet Printing

*Received on August 30, 2021
Accepted on September 17, 2021*

The technology of inkjet printing for the formation of multilayer flexible commutation boards is presented. The technology improves the ergonomics of the electronic devices around a person, making it possible to create products of a new generation: "smart clothes", "smart skin" and "Laboratories on a Chip". One of the main advantages and features of flexible printed electronics is the ability to use organic polymers as a substrate material to provide conformal hybrid integration.

Keywords: inkjet printing, nanoparticles, hybrid flexible electronics, printed electronics, multi-layer circuitry

Acknowledgement. This work has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF N 21-19-00719.

For citation:

Bokhov O. S., Luchinin V. V., Afanasev P. V., Startsev V. A., Mandrik I. V. Flexible multi-layer circuit boards manufacturing using additive technology of inkjet printing, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 111–117.

DOI: 10.17587/nmst.24.111-117

References

1. **Luchinin V. V.** Multidisciplinarnie tekhnologii. Gibkaya electronica i fotonica, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 12 (161), pp. 2–6.
2. **Luchinin V. V., Bokhov O. S., Afanasev P. V., Mandrik I. V., Startsev V. A., Smirnov A. V., Nikonova V. A.** Gibkaya pechatnaya konformnaya electronica. Otechestvennie kompetentsii i elektronnie komponenti, *Nanoindustriya*, 2019, vol. 12, no. 6 (92), pp. 342–350.
3. **Bokhov O. S., Afanasev P. V.** Elektrogidrodinamichesky sposob pechati nanorazmernih 2D- i 3D-struktur, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 8, pp. 475–478.
4. **Bokhov O. S., Afanasev P. V., Grooten M., Henk van Broekhuizen, Startsev V., Mandrik I., Nikonova V., Smirnov A. V.** Super inkjet technology machine development for additive 3D Manufacturing, *International Scientific Journal "Industry 4.0"*, 2019, pp. 175–178.
5. **Afanasev P. V., Bokhov O. S., Mandrik I. V., Startsev V. A.** Kaplestrujnaya tehnologiya gibkoj pechatnoj elektroniki dlya izgotovleniya passivnih komponentov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 8, pp. 465–468.
6. **Toptalov S. I., Ustinov E. M., Afanasev P. V., Bokhov O. S., Mandrik I. V., Startsev V. A.** Sozdanie antennih module kaplestrujnoj tehnologiej, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 8, pp. 470–473.
7. **Borodencov N. I., Bokhov O. S., Smirnov A. V., Shil'kov V. M.** Razrabotka programih sredstv dlya proektirovaniya i sozdaniya ustrojstv gibkoj pechatnoj elektroniki, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 8, pp. 459–462.
8. **Afanasev P. V., Bokhov O. S., Luchinin V. V.** Nauchno-tehnologicheskij kompleks ekspress-prototi pirovaniya izdelij gibkoj elektroniki i fotoniki, *Nanoindustriya*, 2013, no. 6 (44), pp. 94–104.
9. **Luchinin V. V.** Rossijskij pilotnij proekt injiniringovogo centra "Gibkaya pechatnaya electronica i fotonica", *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 8, pp. 451–455.
10. **Luchinin V. V.** Industriya mikro- i nanosistem: ot importozamesheniya k tehnologicheskomu suverenitetu, *Nanoindustriya*, 2018, vol. 11, no. 6 (85), pp. 450–461.
11. **Luchinin V. V., Bokhov O. S., Mandrik I. V., Startsev V. A., Smirnov A. V.** et. al. Konformno integrirovannaya elektronnyaya komponentnaya baza gibkoj pechatnoj elektroniki dlya Interneta ludej, *Elektronika NTB*, 2020, no. 5 (00196), pp. 82–88.

УДК 538.915

DOI: 10.17587/nmst.24.117-123

О. Е. Глухова, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф., e-mail: oeglukhova@yandex.ru,
М. М. Слепченков, канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф., e-mail: slepchenkovm@mail.ru,
А. А. Петрунин, инженер, e-mail: sacha.petrunin@gmail.com
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского, Саратов

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИТНОГО 3D-НАНОМАТЕРИАЛА С ТОПОЛОГИЕЙ ОСТРОВКОВОГО ТИПА

Поступила в редакцию 10.01.2022

Построена атомистическая модель углеродного композитного 3D-наноматериала с топологией островкового типа на основе фуллереновых и графеновых фрагментов, а также хиральных/ахиральных одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) субнанометрового диаметра. Под островковым типом понимается наличие в структуре композита неоднородно распределенных локальных областей с повышенной плотностью наноматериала. Исследовано влияние концентрации нанотрубок в композите на объемную сжимаемость и электронные свойства. Установлено, что увеличение массовой доли ОУНТ в композите приводит к уменьшению коэффициента объемного сжатия и одновременно к улучшению проводящих свойств. Используются классическая молекулярная динамика и метод функционала плотности на базе сильной связи с применением дисперсионной коррекции энергии для физически корректного описания отдельных фрагментов композита, не связанных ковалентно.

Ключевые слова: 3D-наноматериал, сжимаемость, упругость, плотность электронных состояний, уровень Ферми, компьютерное моделирование, молекулярная динамика, SCC-DFTB

Введение

Углеродные композитные 3D-наноматериалы востребованы и очень актуальны в широком спектре применений. Во многих работах подобные 2D-3D-композиты именуют стеклоподобными углеродными наноматериалами, что не меняет сути исследования свойств и перспектив их применения [1–13]. В данной работе эти материалы названы наиболее общим образом — композитными 3D-наноматериалами с топологией островкового типа. Это название лучше всего отображает топологию, ведь, как известно, все подобные наноматериалы характеризуются наличием большого числа нанопор, т. е. их плотность имеет четко выраженные локальные области с большой плотностью, превышающей в несколько раз усредненное значение. Таким образом, атомная структура характеризуется не только нанопорами, но и островками повышенной плотности, образованными скоплением в отдельных локальных местах фрагментов графеновых чешуек, нанотрубок и фуллереновых шапочек. В первую очередь исследуют механические [2, 3], электронные и эмиссионные свойства [4, 5] подобных наноматериалов. Так, в работе [5] было показано, что при легировании атомами калия стеклоподобного углерода удается снизить работу выхода электронов за счет перераспределения электронной плотности на его атомах. Уже установлено, что подобные композитные 3D-наноматериалы перспективны для изготовления литий-ионных батарей [6, 7] и конденсаторов [8] ввиду их аномально высокой емкости, как это было показано в работе [9], а также для создания на их основе сенсоров для выявления дофамина [10], адреналина [11], хлорпромазина [12] и метилдопа [13].

В подавляющем большинстве работ структура наноматериала представлена именно графеновыми чешуйками (моно-/бислойными), слоистыми графеновыми и фуллереновыми фрагментами, в меньшей степени — углеродными нанотрубками. В работах [14–17] показано, что упругие свойства обусловлены именно наличием sp^2 -связных фуллереноподобных фрагментов. Однако нанотрубки будут заметно влиять на распределение нанопор и островков повышенной плотности, поскольку являются 1D-объектами. В связи с этим возникает вопрос: *как массовая доля фуллеренов и углеродных нанотрубок влияет на механические и электронные свойства?* Как показано в работе [17], массовая доля этих объектов регулируется с помощью температуры в ходе синтеза.

Цель данной работы — выявление *in silico* характера и степени влияния массовой доли тонких одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) субнанометрового диаметра на электронную структу-

ру (плотность электронных состояний) и механические свойства, в частности сжимаемость.

Атомистические модели суперячеек

Суперячейка стеклоподобного углерода была получена ранее авторами в работе, посвященной квантово-механическому исследованию функционализации этого материала калием и кислородом [18]. Для этого в периодический ящик помещали фрагменты фуллереноподобных чешуек и монослоев графена. Далее с помощью потенциала межатомного взаимодействия AIREBO, реализованного в программном комплексе Kvazar [19], полученная модель находила минимум энергии путем изменения положения атомных ядер. При этом шаг интегрирования по времени составлял 0,1 фс. В результате была получена суперячейка, которая содержит 3891 атом, объемом $V = 40,8 \times 41,8 \times 39,9 \text{ \AA} = 68,05 \text{ нм}^3$. Размеры, определяющие объем, определяют и размеры периодического ящика 3D-структуры, т. е. плотность такого материала составляет 1,14 г/см³, что согласуется с данными, полученными в ходе синтеза в работах [2, 20]. Массовая доля фуллереноподобных элементов в полученной суперячейке составила 10,2 %.

Для построения суперячеек с ОУНТ применяли классический метод молекулярной динамики, реализованный в программном пакете Gromacs (версия 2021.4) [21]. Построение равновесной структуры осуществляли в три этапа: 1) статическая оптимизация с применением только потенциального взаимодействия между ядрами — микроканонический NVE-ансамбль частиц (при постоянных числе частиц, объеме и энергии); 2) динамическая оптимизация с применением термостата — изотермический NVT-ансамбль (при постоянных числе частиц, объеме и температуре); 3) динамическая оптимизация с применением термостата и баростата — изотермо-изобарический NPT-ансамбль (при постоянных числе частиц, давлении и температуре). При этом в ячейке стеклоподобного углерода, содержащей 3891 атом, проделывали отверстия и в них помещали ОУНТ. В качестве тонких ОУНТ были взяты хиральная трубка (6,5) и ахиральная трубка (4,4). Трубки большего диаметра не рассматривали, поскольку с увеличением диаметра трубок возрастает и число атомов в суперячейке, что резко увеличивает время компьютерных расчетов. Важно, что трубки характеризуются разными типами проводимости и топологией. Для NVE-ансамбля минимизацию проводили методом наискорейшего спуска в силовом поле OPLS-AA [22], которое зарекомендовало себя при расчете физических свойств углеродных материалов [23–26]. Моделирование NVE-ансамбля проводили до тех

пор, пока максимальная нескомпенсированная сила взаимодействия между ядрами не стала равна нулю. При этом радиусы отсечения кулоновского и ван-дер-ваальсового взаимодействия для этого и всех последующих ансамблей были равны $r_{columb} = r_{vdw} = 1$ нм. Далее к NVT-ансамблю был применен термостат Нозе—Гувера [27, 28], что позволило получить равновесную структуру при нормальной температуре $T_{ref} = 300$ К. Временная постоянная термостатирования была выбрана равной $\tau_T = 4$ фс. Моделирование проводили в течение 10 пс с шагом, по времени равным 0,2 фс. Наконец, для моделирования NPT-ансамбля был применен баростат Паринелло—Рамана [29] с опорным давлением $P_{ref} = 1$ бар и временной постоянной баростатирования $\tau_p = 8$ фс. Длительность моделирования составила 50 пс с шагом по времени, как и в предыдущем случае, 0,2 фс. В качестве начального значения коэффициента сжимаемости (величина, обратная коэффициенту объемного сжатия) было выбрано значение $\eta = 4,5 \cdot 10^{-5}$ бар⁻¹, поскольку оно близко к экспериментально определяемому значению коэффициента при комнатной температуре [30, 31]. После реализации этапа моделирования NPT-ансамбля коэффициент сжимаемости уточняют на основе анализа флуктуации объема.

Таким образом, были построены атомистические модели восьми суперячеек композитного 3D-наноматериала с топологией островкового типа: четыре модели с трубками (6,5) и четыре модели с трубками (4,4). Число трубок в каждой модели увеличивали последовательно от одной до четырех. На рис. 1, а и б (см. вторую сторону обложки) представлены суперячейки с ОУНТ (4,4) с одной и четырьмя трубками, трубки выделены красным цветом. На каждом рисунке представлена суперячейка (периодический ящик) и фрагмент 3D-наноматериала, включающий три суперячейки в направлении Y , три в направлении Z и одну в направлении X . Видно, что 3D-наноматериал из графен/фуллереновых фрагментов как бы армирован нанотрубками. Трубки (4,4) соседних ячеек вдоль направления Y расположены достаточно близко друг к другу — на расстоянии $\sim 1,87$ Å. Таким образом, в направлении Y по трубкам будет протекать ток в случае приложения разности потенциалов, а сам 3D-наноматериал становится анизотропным. Аналогичные структуры 3D-наноматериала с трубками (6,5) представлены на рис. 1, в и г. Если у трубки (4,4) диаметр всего 0,54 нм, то у трубки (6,5) диаметр 0,74 нм, и поэтому в суперячейке они занимают гораздо больше места (трубки выделены синим цветом для наглядности). Длины трубок (6,5) и (4,4) выбирали так, чтобы они соответствовали длине суперячейки в направлении Y . Так, длины трубок (6,5) и (4,4) составили 4,06 и 4,059 нм. В от-

личие от тонких трубок (4,4) расстояние между трубками (6,5) соседних ячеек вдоль направления Y больше и составляет $\sim 2,87$ Å. Однако эти трубки имеют полупроводниковый тип проводимости, поэтому в любом случае ток будет протекать по ним только при определенной приложенной разности потенциалов. В данном случае на стыке трубок будет возможен туннельный ток.

Результаты

В данной работе рассчитан коэффициент сжимаемости 3D-наноматериала с различной массовой долей нанотрубок по известной формуле [32]:

$$\langle \delta V^2 \rangle_{NPT} = V k_B T \eta, \quad (1)$$

где η — коэффициент сжимаемости (величина, обратная коэффициенту объемного сжатия). Как было указано выше, коэффициент сжимаемости определяется на этапе моделирования изотермо-изобарического NPT-ансамбля частиц на основе анализа флуктуации объема. Значения коэффициента сжимаемости и коэффициента объемного сжатия для различных моделей представлены в таблице. Как можно видеть из таблицы, с ростом массовой доли ОУНТ для всех рассматриваемых случаев наблюдается увеличение плотности материала. При этом хиральность встраиваемой ОУНТ сильно влияет на механические свойства исследуемой наноструктуры. Так, у моделей 3D-наноматериала с трубками (6,5), обеспечивающих большую плотность наноматериалу, сжимаемость меньше по сравнению с наноматериалом на основе трубок (4,4). То есть с увеличением диаметра ОУНТ снижается механическая отзывчивость, и механические свойства 3D-наноматериала начинают определяться механическими свойствами самих ОУНТ.

Для исследования электронных свойств 3D-наноматериала использован метод функционала плотности на базе сильной связи с самосогласованием заряда (метод SCC-DFTB) [33]. Метод SCC-DFTB зарекомендовал себя, как точный инструмент моделирования электронных свойств различных наноматериалов и особенно углеродных наноматериалов [34]. Полная энергия системы в рамках этого подхода определяется выражением

$$E_{tot} = \sum_{i\mu\nu} c_{\mu}^i c_{\nu}^i H_{\mu\nu}^0 + \frac{1}{2} \sum_{\alpha\beta} \gamma_{\alpha\beta} \Delta q_{\alpha} \Delta q_{\beta} + E_{rep} + E_{dis}, \quad (2)$$

где c_{μ}^i и c_{ν}^i — весовые коэффициенты при разложении по атомным орбиталиям; Δq_{α} и Δq_{β} — флуктуации заряда на атомах α и β , соответственно; $\gamma_{\alpha\beta}$ —

Структурные, упругие и электронные свойства

Число атомов в суперячейке	Массовая доля нанотрубок, %	Плотность, г/см ³	Сжимаемость, ГПа ⁻¹	Модуль объемного сжатия, ГПа	Энергия Ферми, эВ
3891	0	1,18	0,519	1,93	-5,28
Трубка (6,5)					
4010	9,08	1,18	0,1091	9,17	-5,29
4111	17,71	1,32	0,0793	12,61	-5,27
4243	25,73	1,38	0,0539	18,55	-5,32
4336	33,57	1,41	0,0519	19,27	-5,34
Трубка (4,4)					
3994	6,81	1,21	0,2071	4,83	-5,29
4093	13,29	1,24	0,1072	9,35	-5,26
4200	19,43	1,26	0,0788	12,69	-5,28
4287	25,38	1,29	0,0682	14,71	-5,28

функция, экспоненциально убывающая с ростом расстояния между атомами α и β ; E_{rep} — терм, описывающий отталкивательное взаимодействие на малых расстояниях; E_{dis} — энергия взаимодействия Ван-дер-Ваальса. Ван-дер-ваальсовое взаимодействие моделировали с применением универсального силового поля (UFF), которое поддерживает описание взаимодействия различных атомов вплоть до $Z = 103$ [35]. Была рассчитана полная энергия и проведен сравнительный анализ изменения полной энергии исследуемых наноматериалов при увеличении массовой доли трубок. Результаты показаны на рис. 2, где представлен график изменения полной энергии на атом $E_{total}/atom$ при увеличении числа ОУНТ. Как видно из графика, при

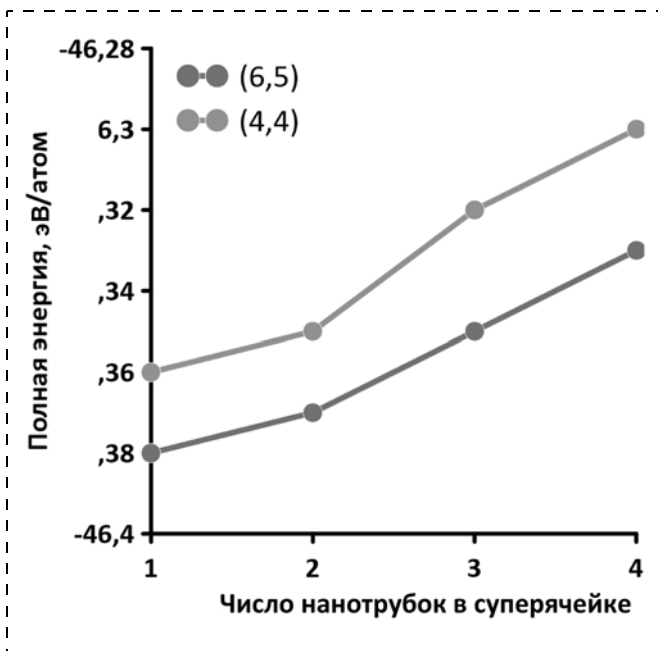


Рис. 2. Полная энергия/атом при изменении числа нанотрубок в суперячейке

увеличении числа трубок величина $E_{total}/atom$ показывает незначительный рост, что можно объяснить образованием дополнительных разрывов в упорядоченной структуре при добавлении ОУНТ. Этот же вывод можно сделать и из анализа экспериментальных данных [2], где показано, что более высокая массовая доля нанотрубных элементов получается при температуре синтеза 2500 °С, когда образуется значительное количество пор и разрывов в атомной конфигурации наноматериала.

Исследовано влияние массовой доли ОУНТ на электронную структуру, в частности рассчитаны плотности электронных состояний (DOS) и энергия Ферми (E_f) для каждой из восьми моделей. Значения энергии Ферми представлены выше в таблице. У 3D-наноматериала без трубок энергия Ферми составляет - 5,28 эВ, а при появлении трубок она начинает менять свое значение и неодинаково для разных трубок. Для моделей наноматериала с трубками (6,5) по мере увеличения их числа наблюдается тенденция к уменьшению энергии Ферми, в то время как в случае трубок (4,4) она остается практически неизменной. Плотности электронных состояний для исследуемых структур демонстрируются на рис. 3 (см. вторую сторону обложки). Во всех случаях на уровне Ферми наблюдается пик интенсивности DOS. Увеличение массовой доли одностенных углеродных нанотрубок существенно (примерно на 100...200 эВ⁻¹) увеличивает число доступных состояний на уровне Ферми, что свидетельствует об улучшении проводящих свойств исследуемых структур. Стоит отметить, что хиральность встраиваемых ОУНТ незначительно (примерно 10...30 эВ⁻¹) изменяет число доступных состояний на уровне Ферми.

Заключение

Построены атомистические модели суперячеек нового композитного 3D-наноматериала с тополо-

гией островкового типа, обусловленного наличием в материале из графен/фуллереновых фрагментов армирующих одностенных углеродных нанотрубок субнанометрового диаметра. Установлена предельная массовая доля нанотрубок в подобном материале. Она составляет ~25,4...33,5 %, что обеспечивает высокую плотность материала ~1,3...1,4 г/см³. Дальнейшее увеличение массовой доли приводит к резкому возрастанию энергии суперячейки и росту внутреннего механического напряжения, делая материал хрупким и энергетически нестабильным.

Исследована прочность на сжатие. Установлено, что при увеличении массовой доли одностенных углеродных нанотрубок сжимаемость снижается и, соответственно, возрастает упругость. Коэффициент объемного сжатия при максимальной массовой доле нанотрубок увеличивается в 7...10 раз по сравнению с наноматериалом без ОУНТ, в зависимости от диаметра трубки. Трубки большего диаметра обеспечивают и большую упругость. Также установлено, что большая массовая доля одностенных углеродных нанотрубок улучшает проводящие свойства наноматериала, поскольку наблюдается резкое увеличение числа доступных электронных состояний вблизи уровня Ферми. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что 3D-наноматериал с топологией островкового типа на основе нанотрубок перспективен для эмиссионной электроники, где нужен проводящий и прочный материал для изготовления эмиттеров автокатодов, которые должны выдерживать большие внешние электрические поля и обеспечивать большой эмиссионный ток.

Исследование механических свойств 3D-наноматериала с топологией островкового типа на основе нанотрубок проводили в рамках гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (№ МК-2289.2021.1.2). Исследование электронных свойств 3D-наноматериала выполняли при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FSRR-2020-0004).

Список литературы

1. **Sharma S.** Glassy Carbon: A Promising Material for Micro- and Nanomanufacturing // *Materials*. 2018. Vol. 11, N. 10. P. 1857.
2. **Jurkiewicz K., Pawlyta M., Zygadlo D., Chrobak D., Duber S., Wrzalik R., Ratuszna A., Burian A.** Evolution of glassy carbon under heat treatment: correlation structure—mechanical properties // *Journal of Materials Science*. 2018. Vol. 53. P. 3509—3523.
3. **Bauer J., Schroer A., Schwaiger R., Kraft O.** Approaching theoretical strength in glassy carbon nanolattices // *Nature Mater*. 2016. Vol. 15. P. 438—443.

4. **Slepchenkov M. M., Shmygin D. S., Zhang G., Glukhova O. E.** Controlling the electronic properties of 2D/3D pillared graphene and glass-like carbon via metal atom doping // *Nanoscale*. 2019. Vol. 11, Is. 35. P. 16414—16427.
5. **Slepchenkov M. M., Nefedov I. S., Glukhova O. E.** Controlling the Electronic Properties of a Nanoporous Carbon Surface by Modifying the Pores with Alkali Metal Atoms // *Materials*. 2020. Vol. 13, N. 3. P. 610.
6. **Zampardi G., La Mantia F., Schuhmann W.** Determination of the formation and range of stability of the SEI on glassy carbon by local electrochemistry // *RSC Adv*. 2015. Vol. 5, N. 39. P. 31166—31171.
7. **Shimizu A., Tachikawa H.** Molecular dynamics simulation on diffusion of lithium atom pair in C150H30 cluster model for glassy carbon at very low temperatures // *Electrochimica Acta*. 2003. Vol. 48, N. 12. P. 1727—1733.
8. **Sharma S., Kamath R., Madou M.** Porous glassy carbon formed by rapid pyrolysis of phenol-formaldehyde resins and its performance as electrode material for electrochemical double layer capacitors // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2014. Vol. 108. P. 12—18.
9. **Bozym D. J., Uralcan B., Limmer D. T., Pope M. A., Szamreta N. J., Debenedetti P. G., Aksay I. A.** Anomalous Capacitance Maximum of the Glassy Carbon—Ionic Liquid Interface through Dilution with Organic Solvents // *J. Phys. Chem. Lett*. 2015. Vol. 6, N. 13. P. 2644—2648.
10. **Palanisamy S., Ku S., Chen S. M.** Dopamine sensor based on a glassy carbon electrode modified with a reduced graphene oxide and palladium nanoparticles composite // *Micromol Chem. Lett*. 2013. Vol. 180. P. 1037—1042.
11. **Cui F., Zhang X.** Electrochemical sensor for epinephrine based on a glassy carbon electrode modified with graphene/gold nanocomposites // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2012. Vol. 669. P. 35—41.
12. **Tajik S., Beitollahi H.** A Sensitive Chlorpromazine Voltammetric Sensor Based on Graphene Oxide Modified Glassy Carbon Electrode // *Analytical and Bioanalytical Chemistry Research*. 2019. Vol. 6, N. 1. P. 171—182.
13. **Tajik S., Beitollahi H., Biparva P.** Methyl dopa electrochemical sensor based on a glassy carbon electrode modified with Cu/TiO₂ nanocomposite // *J. Serb. Chem. Soc*. 2018. Vol. 83, N. 7—8. P. 863—874.
14. **Harris P. J. F.** Fullerene-related structure of commercial glassy carbons // *Philosophical Magazine*. 2004. Vol. 84, N. 29. P. 3159—3167.
15. **Harris P. J. F., Tsang S. C.** High-resolution electron microscopy studies of non-graphitizing carbons // *Philosophical Magazine A*. 1997. Vol. 76, N. 3. P. 667—677.
16. **Harris P. J. F.** Fullerene-like models for microporous carbon // *Journal of Materials Science*. 2013. Vol. 48. P. 565—577.
17. **Jurkiewicz K., Pawlyta M., Zygadlo D., Zygadlo D., Chrobak D., Duber S., Wrzalik R., Ratuszna A., Burian A.** Evolution of glassy carbon under heat treatment: correlation structure—mechanical properties // *Journal of Materials Science*. 2018. Vol. 53. P. 3509—3523.
18. **Glukhova O. E., Slepchenkov M. M.** Electronic Properties of the Functionalized Porous Glass-like Carbon // *J. Phys. Chem. C*. 2016. Vol. 120. P. 17753—17758.
19. **Software package KVAZAR.** Glukhova Research Group. URL: <http://nanokvazar.ru/> (дата обращения 25.12.2021).
20. **Zhao Z., Wang E. F., Yan H., Kono Y., Wen B., Bai L., Shi F., Zhang J., KenneyBenson C., Park C., Wang Y., Shen G.** Nanoarchitected materials composed of fullerene-like spherulites and disordered grapheme layers with tunable mechanical properties // *Nat. Commun*. 2015. Vol. 6. P. 1—10.
21. **GROMACS 2021.1.** URL: <https://manual.gromacs.org/2021.1/index.html> (дата обращения: 27.12.2021).

22. **Jorgensen W. L., Maxwell D. S., Tirado-Rives J.** Development and Testing of the OPLS All-Atom Force Field on Conformational Energetics and Properties of Organic Liquids // *J. Am. Chem. Soc.* 1996. Vol. 118, N. 45. P. 11225–11236.
23. **Lazar P., Karlický F., Jurečka P., Kocman M., Otyepková E., Šafářová K., Otyepka M.** Adsorption of Small Organic Molecules on Graphene // *J. Am. Chem. Soc.* 2013. Vol. 135, N. 16. P. 6372–6377.
24. **Schyman P., Jorgensen W. L.** Exploring Adsorption of Water and Ions on Carbon Surfaces Using a Polarizable Force Field // *J. Phys. Chem. Lett.* 2013. Vol. 4, N. 3. P. 468–474.
25. **Sui M. Y., logo O., Xiao S., Wang F., Sun G. Y.** A screening of properties and application based on dimerized fused-ring non-fullerene acceptors: influence of C[double bond, length as m-dash]C, C–C, spiro-C linkers // *Journal of Materials Chemistry C.* 2021. Vol. 9. P. 13162–13171.
26. **Li Z., Tozer T., Alisaraie L.** Molecular Dynamics Studies for Optimization of Noncovalent Loading of Vinblastine on Single-Walled Carbon Nanotube // *J. Phys. Chem. C.* 2016. Vol. 120, N. 7. P. 4061–4070.
27. **Nose S.** A molecular dynamics method for simulations in the canonical ensemble // *Molecular Physics.* 1984. Vol. 52, N. 2. P. 255–268.
28. **Hoover W. G.** Canonical dynamics: Equilibrium phase-space distributions // *Phys. Rev. A.* 1985. Vol. 31. P. 1695–1697.
29. **Parrinello M., Rahman A.** Polymorphic transitions in single crystals: A new molecular dynamics method // *Journal of Applied Physics.* 1981. Vol. 52. P. 7182–7190.
30. **Molodets A. M., Golyshev A. A., Savinykh A. S., Kim V. V.** Shock-wave studies of anomalous compressibility of glassy carbon // *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* 2016. Vol. 122, N. 2. P. 289–297.
31. **Tan L., Sheng H., Lou H., Cheng B., Xuan Y., Prakapenka V. B., Greenberg E., Zeng Q., Peng F., Zeng Z.** High-pressure tetrahedral amorphous carbon synthesized by compressing glassy carbon at room temperature // *The Journal of Physical Chemistry C.* 2020. Vol. 124, N. 9. P. 5489–5494.
32. **Allen M. P., Tildesley D. J.** Computer simulation of liquids // Oxford university press. 2017. 640 p.
33. **Frauenheim T., Seifert G., Elstner M., Niehaus T., Kohler C., Amkreutz M., Sternberg M., Hajnal Z., Di Carlo A., Suhai S.** Atomistic simulations of complex materials: ground-state and excited-state properties // *Journal of Physics: Condensed Matter.* 2002. Vol. 14, N. 11. P. 3015.
34. **Slepchenkov M. M., Shmygin D. S., Zhang G., Glukhova O. E.** Controlling anisotropic electrical conductivity in porous graphene-nanotube thin films // *Carbon.* 2020. Vol. 165. P. 139–149.
35. **Rappe A. K., Casewit C. J., Colwell K. S., Goddard W. A., Skiff W. M.** UFF, a full periodic table force field for molecular mechanics and molecular dynamics simulations // *J. Am. Chem. Soc.* 1992. Vol. 114, N. 25. P. 10024–10035.

O. E. Glukhova, Head of Chair, **M. M. Slepchenkov**, Associate Professor, **A. A. Petrunin**, Engineer, e-mail: sacha.petrynin@gmail.com, Institute of Physics, Saratov State University, Saratov, 410012, Russian Federation

Corresponding author:

Petrunin Alexandr A., Engineer, Institute of Physics, Saratov State University, Saratov, 410012, Russian Federation
e-mail: sacha.petrynin@gmail.com

Mechanical and Electronic Properties of a Carbon Composite 3D Nanomaterial with an Island-type Topology

Received on January 10, 2022

Accepted on February 01, 2022

An atomistic model of a carbon composite 3D nanomaterial with an island-type topology based on fullerenes, graphene fragments and chiral/achiral single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) of subnanometer diameter is constructed. The island type refers to the presence in a composite structure of inhomogeneously distributed local regions with increased density of nanomaterial. The effect of the concentration of nanotubes in the composite on the volumetric compressibility and electronic properties is investigated. It has been found that an increase in the mass fraction of SWCNT in the composite leads to a decrease in the volume compression ratio and, at the same time, to an improvement in the conductive properties. Classical molecular dynamics and the density functional based tight binding (DFTB) method with the use of energy dispersion correction are used for the physically correct description of individual fragments of the composite that are not covalently bonded.

Keywords: 3D nanomaterial, compressibility, elasticity, density of electronic states, Fermi level, computer modeling, molecular dynamics, SCC-DFTB

For citation:

Glukhova O. E., Slepchenkov M. M., Petrunin A. A. Mechanical and Electronic Properties of a Carbon Composite 3D Nanomaterial with an Island-Type Topology, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 117–123.

DOI: [10.17587/nmst.24.117-123](https://doi.org/10.17587/nmst.24.117-123)

References

1. **Sharma S.** Glassy Carbon: A Promising Material for Micro- and Nanomanufacturing, *Materials*, 2018, vol. 11, no. 10, pp. 1857.
2. **Jurkiewicz K., Pawlyta M., Zygadlo D., Chrobak D., Duber S., Wrzalik R., Ratuszna A., Burian A.** Evolution of glassy carbon under heat treatment: correlation structure—mechanical properties, *Journal of Materials Science*, 2018, vol. 53, pp. 3509—3523.
3. **Bauer J., Schroer A., Schwaiger R., Kraft O.** Approaching theoretical strength in glassy carbon nanolattices, *Nature Mater*, 2016, vol. 15, pp. 438—443.
4. **Slepchenkov M. M., Shmygin D. S., Zhang G., Glukhova O. E.** Controlling the electronic properties of 2D/3D pillared graphene and glass-like carbon via metal atom doping, *Nanoscale*, 2019, vol. 11, no. 35, pp. 16414—16427.
5. **Slepchenkov M. M., Nefedov I. S., Glukhova O. E.** Controlling the Electronic Properties of a Nanoporous Carbon Surface by Modifying the Pores with Alkali Metal Atoms, *Materials*, 2020, vol. 13, no. 3, pp. 610.
6. **Zampardi G., La Mantia F., Schuhmann W.** Determination of the formation and range of stability of the SEI on glassy carbon by local electrochemistry, *RSC Adv.*, 2015, vol. 5, no. 39, pp. 31166—31171.
7. **Shimizu A., Tachikawa H.** Molecular dynamics simulation on diffusion of lithium atom pair in C150H30 cluster model for glassy carbon at very low temperatures, *Electrochimica Acta*, 2003, vol. 48, no. 12, pp. 1727—1733.
8. **Sharma S., Kamath R., Madou M.** Porous glassy carbon formed by rapid pyrolysis of phenol-formaldehyde resins and its performance as electrode material for electrochemical double layer capacitors, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, vol. 108, pp. 12—18.
9. **Bozym D. J., Uralcan B., Limmer D. T., Pope M. A., Szamreta N. J., Debenedetti P. G., Aksay I. A.** Anomalous Capacitance Maximum of the Glassy Carbon—Ionic Liquid Interface through Dilution with Organic Solvents, *J. Phys. Chem. Lett.*, 2015, vol. 6, no. 13, pp. 2644—2648.
10. **Palanisamy S., Ku S., Chen S. M.** Dopamine sensor based on a glassy carbon electrode modified with a reduced graphene oxide and palladium nanoparticles composite, *Microchimica Acta*, 2013, vol. 180, pp. 1037—1042.
11. **Cui F., Zhang X.** Electrochemical sensor for epinephrine based on a glassy carbon electrode modified with graphene/gold nanocomposites, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2012, vol. 669, pp. 35—41.
12. **Tajik S., Beitollahi H.** A Sensitive Chlorpromazine Voltammetric Sensor Based on Graphene Oxide Modified Glassy Carbon Electrode, *Analytical and Bioanalytical Chemistry Research*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 171—182.
13. **Tajik S., Beitollahi H., Biparva P.** Methyl dopa electrochemical sensor based on a glassy carbon electrode modified with Cu/TiO₂ nanocomposite, *J. Serb. Chem. Soc.*, 2018, vol. 83, no. 7—8, pp. 863—874.
14. **Harris P. J. F.** Fullerene-related structure of commercial glassy carbons, *Philosophical Magazine*, 2004, vol. 84, no. 29, pp. 3159—3167.
15. **Harris P. J. F., Tsang S. C.** High-resolution electron microscopy studies of non-graphitizing carbons, *Philosophical Magazine A*, 1997, vol. 76, no. 3, pp. 667—677.
16. **Harris P. J. F.** Fullerene-like models for microporous carbon, *Journal of Materials Science*, 2013, vol. 48, pp. 565—577.
17. **Jurkiewicz K., Pawlyta M., Zygadlo D., Zygadlo D., Chrobak D., Duber S., Wrzalik R., Ratuszna A., Burian A.** Evolution of glassy carbon under heat treatment: correlation structure—mechanical properties, *Journal of Materials Science*, 2018, vol. 53, pp. 3509—3523.
18. **Glukhova O. E., Slepchenkov M. M.** Electronic Properties of the Functionalized Porous Glass-like Carbon, *J. Phys. Chem. C.*, 2016, vol. 120, pp. 17753—17758.
19. **Software package KVAZAR.** Glukhova Research Group. URL: <http://nanokvazar.ru/> (дата обращения 25.12.2021).
20. **Zhao Z., Wang E. F., Yan H., Kono Y., Wen B., Bai L., Shi F., Zhang J., KenneyBenson C., Park C., Wang Y., Shen G.** Nanoarchitected materials composed of fullerene-like spheroids and disordered grapheme layers with tunable mechanical properties, *Nat. Commun*, 2015, vol. 6, pp. 1—10.
21. **GROMACS 2021.1.** URL: <https://manual.gromacs.org/2021.1/index.html> (дата обращения: 27.12.2021).
22. **Jorgensen W. L., Maxwell D. S., Tirado-Rives J.** Development and Testing of the OPLS All-Atom Force Field on Conformational Energetics and Properties of Organic Liquids, *J. Am. Chem. Soc.*, 1996, vol. 118, no. 45, pp. 11225—11236.
23. **Lazar P., Karlický F., Jurečka P., Kocman M., Otyepková E., Šafařová K., Otyepka M.** Adsorption of Small Organic Molecules on Graphene, *J. Am. Chem. Soc.*, 2013, vol. 135, no. 16, pp. 6372—6377.
24. **Schyman P., Jorgensen W. L.** Exploring Adsorption of Water and Ions on Carbon Surfaces Using a Polarizable Force Field, *J. Phys. Chem. Lett.*, 2013, vol. 4, no. 3, pp. 468—474.
25. **Sui M. Y., logo O., Xiao S., Wang F., Sun G. Y.** A screening of properties and application based on dimerized fused-ring non-fullerene acceptors: influence of C[double bond, length as m-dash]C, C—C, spiro-C linkers, *Journal of Materials Chemistry C.*, 2021, vol. 9, pp. 13162—13171.
26. **Li Z., Tozer T., Alisarai L.** Molecular Dynamics Studies for Optimization of Noncovalent Loading of Vinblastine on Single-Walled Carbon Nanotube, *J. Phys. Chem. C.*, 2016, vol. 120, no. 7, pp. 4061—4070.
27. **Nose S.** A molecular dynamics method for simulations in the canonical ensemble, *Molecular Physics*, 1984, vol. 52, no. 2, pp. 255—268.
28. **Hoover W. G.** Canonical dynamics: Equilibrium phase-space distributions, *Phys. Rev. A.*, 1985, vol. 31, pp. 1695—1697.
29. **Parrinello M., Rahman A.** Polymorphic transitions in single crystals: A new molecular dynamics method, *Journal of Applied Physics*, 1981, vol. 52, pp. 7182—7190.
30. **Molodets A. M., Golyshev A. A., Savinykh A. S., Kim V. V.** Shock-wave studies of anomalous compressibility of glassy carbon, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2016, vol. 122, no. 2, pp. 289—297.
31. **Tan L., Sheng H., Lou H., Cheng B., Xuan Y., Prakapenka V. B., Greenberg E., Zeng Q., Peng F., Zeng Z.** High-pressure tetrahedral amorphous carbon synthesized by compressing glassy carbon at room temperature, *The Journal of Physical Chemistry C.*, 2020, vol. 124, no. 9, pp. 5489—5494.
32. **Allen M. P., Tildesley D. J.** Computer simulation of liquids, Oxford university press, 2017, 640 p.
33. **Frauenheim T., Seifert G., Elstner M., Niehaus T., Kohler C., Amkreutz M., Sternberg M., Hajnal Z., Di Carlo A., Suhai S.** Atomistic simulations of complex materials: ground-state and excited-state properties, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2002, vol. 14, no. 11, pp. 3015.
34. **Slepchenkov M. M., Shmygin D. S., Zhang G., Glukhova O. E.** Controlling anisotropic electrical conductivity in porous graphene-nanotube thin films, *Carbon*, 2020, vol. 165, pp. 139—149.
35. **Rappe A. K., Casewit C. J., Colwell K. S., Goddard W. A., Skiff W. M.** UFF, a full periodic table force field for molecular mechanics and molecular dynamics simulations, *J. Am. Chem. Soc.*, 1992, vol. 114, no. 25, pp. 10024—10035.

В. А. Беспалов¹, д-р техн. наук, ректор МИЭТ, e-mail: rector@miet.ru,
Е. Э. Гусев², канд. техн. наук, вед. инженер, e-mail: bubbledouble@mail.ru,
Н. А. Дюжев¹, канд. физ.-мат. наук, директор ЦКП "МСТ и ЭКБ", e-mail: djuzhev@ckp-miet.ru,
П. С. Иванин¹, инженер, e-mail: ivanin@ckp-miet.ru, **М. А. Махиборода**², канд. физ.-мат. наук,
 генеральный директор, e-mail: m.makhiboroda@gmail.com

¹ НИУ МИЭТ, Зеленоград, Москва, 124498

² ООО "Сенсор Микрон", Москва, 107045

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ МИКРОСБОРКИ

Поступила в редакцию 01.10.2021

Трехмерная интеграция, которая повышает производительность интегральной схемы за счет уменьшения площади кристалла и уменьшения времени задержки сигнала, стала возможной благодаря сквозным отверстиям в кремнии (TSV). Объединение ИС в микросборку и плотное соединение их по вертикали решает проблему с эффективностью. Ввиду необходимости минимизировать параметры уровня микросхемы, число транзисторов на единицу площади продолжает увеличиваться. Все компоненты ИС должны быть электрически соединены для обеспечения надлежащей работы. За прошедшие годы были разработаны различные архитектуры ИС, чтобы продолжить миниатюризацию. Данная статья посвящена существующим методам микросборки, начиная от двумерной интеграции (2D) и заканчивая трехмерной (3D).

Ключевые слова: 2D-интеграция, 2.5D-интеграция, 3D-интеграция, интеграция с помощью сквозных канавок в кремнии (TSV), micro-bump интеграция, интеграция с помощью встроенного кремниевого моста (EMIB), гибридный бондинг, микросборка, интегральные схемы

Введение

Электронные устройства используют ежедневно, и поэтому они оказывают огромное влияние на нашу жизнь, и жизнь без них уже невозможна. Таким образом, вопросы надежности вновь разработанных устройств представляют большой технический и экономический интерес. Актуальность направления микросборки доказывается многочисленными аналитическими отчетами, из которых можно выделить доклад компании Yole Development 2020 года о трехмерной интеграции. В настоящее время только три компании остались в гонке по минимизации размеров в горизонтальной плоскости. Это связано с приближением технологичес-

кой нормы к значению периода кристаллической решетки кремния. Возрастающая стоимость литографического оборудования и сопутствующих шаблонов не внушает энтузиазма. На рис. 1 показана зависимость стоимости установки передовой фотолитографии от года. Как видно из данного графика, стоимость передовой установки операции фотолитографии возросла примерно на три порядка вследствие наноразмерных эффектов. Поэтому предлагается переход от горизонтального интегрирования к вертикальному. За прошедшие годы были разработаны различные архитектуры ИС для продолжения миниатюризации межсоединений. С увеличением сложности электронных устройств количество межсоединений увеличивалось в геометрической прогрессии. Вначале соединение электронных устройств было сложным, дорогим и ненадежным. Благодаря уменьшению размера ИС, задержка транзистора снижается в отличие от задержки, вызванной межсоединениями.

Для повышения плотности межсоединений разработчики стали переходить от двумерной интеграции (2D) к трехмерной (3D), в которой используются микрометровые линейные размеры. При этом применяют следующие подходы для осуществления данного перехода: интеграция через интерпозеры, микробампы, встроенный мост (EMIB), сквозные канавки в кремнии (TSV), гибридный бондинг.

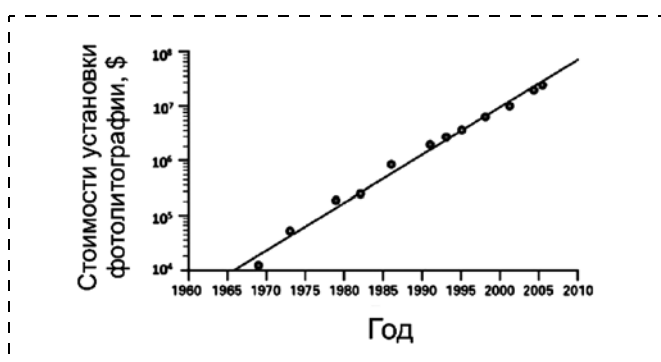


Рис. 1. График зависимости стоимости передовой операции фотолитографии от года

Двухмерная (2D) интеграция

Подход 2D IC состоит из соединения различных дискретных устройств с их корпусами с помощью печатной платы (механическая опора с токопроводящими дорожками) (рис. 2, а). Ведущие компании в области микроэлектроники всегда стремятся увеличить производительность и интегрировать самые передовые технологии, чтобы повысить конкурентоспособность своей продукции. Двухмерная интеграция различных технологий является преимуществом для производительности устройства, но постоянный спрос приводит к необходимости создания большой и громоздкой печатной платы. В печатной плате сигнал распространяется медленно вследствие дополнительной длины цепи, что снижает производительность. В двухмерных IC кристаллы также могут быть напрямую соединены проводом (рис. 2, а). Эта технология подключения имеет значительные ограничения с точки зрения площади и производительности, поскольку она страдает от большой длины межсоединений, а также узкого места в полосе пропускания межсоединений. Начало 1990-х годов было временем появления многочиповых модулей (МЧМ), в которых цифровые матрицы монтировали на одной и той же подложке корпуса [3]. Следующим шагом стала технология System-on-Chip (SoC), в которой все дискретные устройства были реализованы на одном кристалле [4]. Эта смешанная технология была новаторской, но она привела к увеличению площади кристалла и, как следствие, к задержкам передачи сигнала (рис. 2, б). Кроме того, технология SoC требует различных и сложных процессов, и эти аспекты, очевидно, способствовали развитию и успеху новой архитектуры.

System-in-Package (SiP) была новой технологией, доступной в начале 2000-х годов (см. рис. 2, б), способной преодолеть проблему размера технологии SoC [5]. Здесь монтируется несколько кристал-

лов и/или устройств Chip-Scale Package (CSP), они соединены на общей подложке так, что все компоненты собраны в одной сборке. В отличие от технологии SoC, SiP позволяет включать аналоговые, цифровые и радиочастотные элементы в одну и ту же сборку. Все отдельные кристаллы могут быть изготовлены с использованием наиболее подходящего технологического процесса и впоследствии интегрированы в упаковку.

2.5D-интеграция

2.5D-интегральная схема (2.5D IC) объединяет несколько кристаллов в одном корпусе [6] без объединения их в трехмерную интегральную схему (3D IC) со сквозными кремниевыми переходными отверстиями (TSV) [7]. Термин "2.5D" возник, когда 3D IC с TSV были довольно новыми и все еще технологически сложными. Разработчики микросхем поняли, что многие преимущества трехмерной интеграции можно приблизить, разместив чистые кристаллы рядом на переходнике, вместо того, чтобы складывать их вертикально. Если шаг очень мал, а межсоединение очень короткое, сборку можно сделать как единый компонент с лучшими размерами, меньшей массой и большей мощностью, чем сопоставимая сборка двухмерной печатной платы.

Некоторые преимущества 2.5D IC:

- промежуточное устройство может поддерживать разнородную интеграцию, т. е. кристаллы разного шага, размера, материала и технологического узла [8];
- размещение кристаллов бок о бок вместо их сборки снижает тепловыделение [9];
- улучшить или изменить 2.5D-упаковку так же просто, как заменить компонент и переделать интерпозер в соответствии с требованиями; намного быстрее и проще, чем переделывать всю 3D IC или систему на кристалле (SoC).

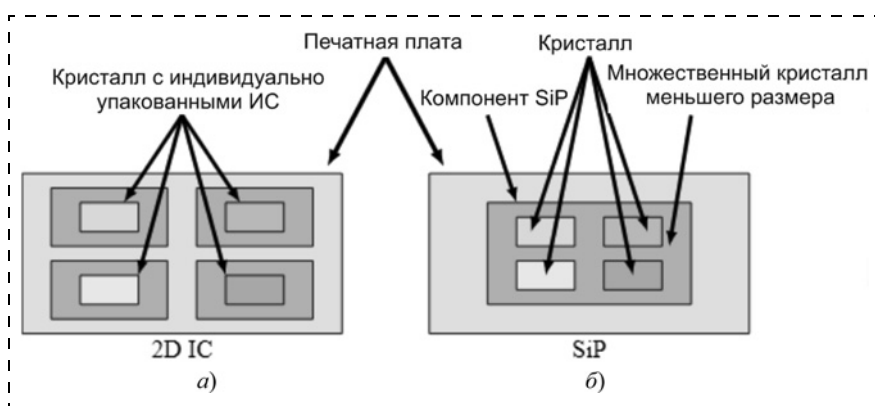


Рис. 2. Виды двухмерной интеграции:

а — различные дискретные устройства со своими собственными корпусами, соединенными между собой с помощью печатной платы; б — конфигурация SiP, в которой несколько кристаллов и/или CSP соединены на общей подложке [2]

Чтобы объяснить архитектуру 2.5D IC, обратимся к 2D IC/SiP. Основное различие между этими двумя конфигурациями состоит в том, что для 2.5D IC/SiP используется промежуточный переходник между подложкой SiP и кристаллами (рис. 3, а). TSV размещены в переходнике, соединяющем слой металлизации на его верхней и нижней поверхностях. Интерпозер — это электрический интерфейс, используемый для электрической маршрутизации одного разъема или соединения к другому, и состоит из нескольких слоев RDL (словес перераспределения) и TSV.

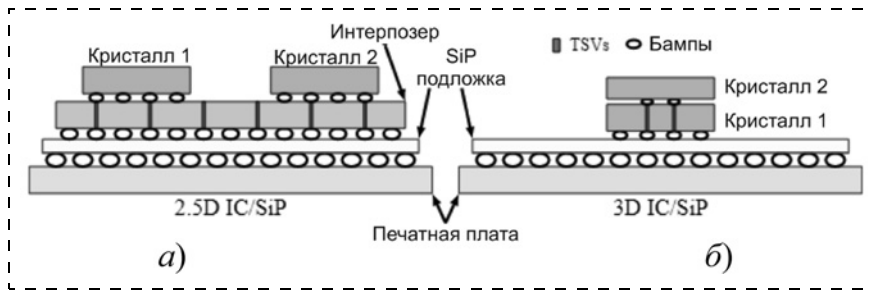


Рис. 3. Архитектура 2.5D IC (а); и архитектура 3D IC [2] (б)

В промежуточном устройстве выбор материалов для использования должен учитывать электрические, механические, термические и физические свойства, а также стоимость устройства. Стекло, органические материалы и кремний широко используют в качестве промежуточных материалов [2]. Технология 2.5D IC/SiP приводит к увеличению емкости и производительности, а следовательно, и к использованию матриц меньшего размера. Недостатком такой интеграции является повышенная сложность работы.

Идея архитектуры 3D IC/SiP заключается в установке кристаллов друг на друга (рис. 3, б). Отдельный кристалл может быть очень тонким, и поэтому можно установить больше кристаллов друг на друга. При использовании TSV верхний кристалл может электрически связываться с нижним кристаллом и подложкой SiP.

3D-stacking (трехмерная упаковка). Многие исследования возможности выполнения и проектирования за последние годы показали, что устройства, основанные на 3D-интеграции, могут значительно превосходить традиционные планарные (2D) устройства. Кроме того, поскольку сборка устройств является основным фактором стоимости, возможность интеграции нескольких функциональных объектов в одну упаковку предлагает огромный потенциал для снижения затрат [10]. На уровне исследований техническая возможность успешного проведения была доказана для множества процессов. В настоящее время внимание уделяется инновационным производственным технологиям и схемам интеграции процессов, которые отвечают как экономическим, так и техническим требованиям.

Сборка отдельных микросхем (как кристалл—пластина, так и пластина—пластина) имеет неоспоримое преимущество, заключающееся в том, что различные функциональные подсистемы, такие как логика и память, можно обрабатывать на отдельных пластинах, что значительно снижает сложность и число этапов процесса. Отдельные кристаллы можно обрабатывать на разнородных материалах на разных фабриках и различными производителями.

Существуют два основных типа соединения пластин: соединение Cu—Cu (соединения медь—

медь между упаковками ИС, используемые в TSV) [11, 12] и сквозные переходные отверстия в кремнии (TSV). В настоящее время внедряется и исследуется ряд ключевых подходов к упаковке. К ним относятся соединения кристалл—кристалл, кристалл—пластина, пластина—пластина.

Кристалл—кристалл (D2D).

Электронные компоненты строят на нескольких кристаллах, кото-

рые затем выравнивают и склеивают (рис. 4). Разбавление и создание TSV могут быть выполнены до или после склеивания. Одно из преимуществ метода "кристалл—кристалл" состоит в том, что сначала можно протестировать каждый компонентный кристалл, так что один плохой кристалл не испортит всю сборку [13]. Более того, каждый кристалл в 3D IC может быть заранее разделен на группы для оптимизации энергопотребления и производительности.

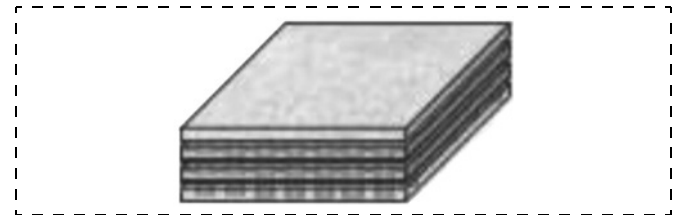


Рис. 4. Упаковка кристалл — кристалл (D2D)

Ключевым недостатком этого процесса является то, что, поскольку нижний кристалл полностью собран с подложкой корпуса (обычно с органической упаковкой), он может сильно деформироваться ввиду несоответствия его коэффициента теплового расширения (КТР) с КТР упаковки из органического ламината. Следовательно, во время прикрепления верхнего кристалла к нижнему корпусу выход кристалла к корпусу может быть снижен вследствие возникающих проблем выравнивания. В общем, процесс трехмерной укладки требует очень хорошей характеристики собираемых поверхностей в зависимости от температуры.

Кристалл—пластина (D2W). Электронные компоненты построены на двух полупроводниковых пластинах (рис. 5). Одну пластину нарезают на кристаллы; отдельные кристаллы выравнивают и прикрепляют к участкам кристаллов второй пластины. Как и в методе "пластина—пластина", уто-

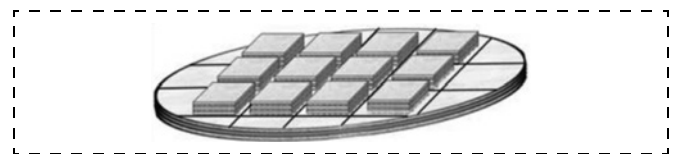


Рис. 5. Упаковка кристалл — пластина (D2W)

нение и создание TSV выполняют до или после склеивания [14]. Дополнительные кристаллы могут быть добавлены в сборку перед нарезкой.

Пластина—пластина (W2W). Электронные компоненты расположены на двух или более полупроводниковых пластинах, которые затем выравнивают, склеивают и разрезают на трехмерные ИС (рис. 6). Вертикальные соединения либо встраивают в пластины перед склеиванием, либо создают в сборке после склеивания. Сквозные отверстия в кремнии (TSV) проходят через кремниевую пластину между активными слоями и/или между активным слоем и внешней контактной площадкой. Соединение пластины с пластиной может снизить выход годной продукции, поскольку, если один из всех кристаллов в трехмерной ИС окажется дефектным, вся трехмерная ИС будет дефектной.

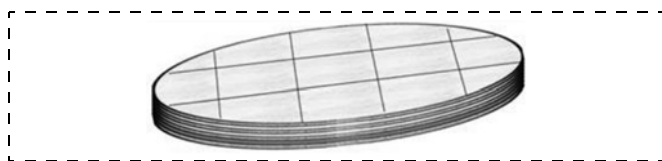


Рис. 6. Упаковка пластина — пластина (W2W)

Преимущество процесса W2W (Wafer to Wafer) заключается в том, что это периодический процесс с высокой производительностью. Ключевые ограничения процесса W2W для пластин следующие: все кристаллы должны быть одного размера; процесс исключает возможность соединения заведомо неисправного кристалла; потеря выхода вследствие несовпадения во время этого процесса может быть очень дорогой, особенно в случае, когда несколько пластин уложены в сборку.

Интеграция через Microbumps. В корпусе интегральных схем шарик припоя, часто называемый "бампом", обеспечивает контакт между корпусом микросхемы и печатной платой, а также между упаковками, уложенными друг на друга в многочиповые модули [15]. В последнем случае эти шарики можно назвать микробампами (microbump, ubump). Шарики припоя можно размещать вручную или с помощью автоматизированного оборудования и фиксировать на месте с помощью клейкого флюса. Шарик припоя деформируют до формы, напоминающей форму монеты, что способствует повышению надежности контакта [16].

На рис. 7 (см. третью сторону обложки) показана технологическая схема изготовления микробампов из припоя CuSn. Микробампы CuSn изготавливают на обоих Si-чипах на уровне пластины методом гальваники. Общая

толщина Cu и Sn составляет 10 мкм. Для надежного соединения Sn-припой должен быть достаточно толстым, чтобы после оплавления оставался чистый Sn для соединения. После однократного оплавления толщина образовавшегося интерметаллида Cu_6Sn_5 составляет около 1,5 мкм [17], поэтому лучше иметь слой Sn толще 1,5 мкм. Однако, если слой Sn слишком толстый, произойдет смачивание боковой стенки, что приведет к проблеме смачивания ввиду нехватки припоя Sn поверх медной стойки или приведет к образованию перемычек между соседними соединениями ввиду сверхмелкого шага. Как показано в технологической схеме изготовления на рис. 7 (см. третью сторону обложки), сначала на пластину наносят слои SiO_2 и пленку Al толщиной 1 мкм (рис. 7, а), затем слой фоторезиста толщиной 2 мкм методом центрифугирования и узор (рис. 7, б). Далее Al травят, чтобы сформировать металлическую подушку, и удаляют фоторезист (рис. 7, в), наносят еще один пассивирующий слой и формируют узор (рис. 7, г, д и е). Затем напыляют Ta/Cu адгезионного слоя и затравочного слоя. Толщина Ta и Cu составляет 100,0 и 50,0 нм соответственно (рис. 7, ж). Затем наносят толстый слой фоторезиста и формируют узор в виде гальванической формы (рис. 7, з), далее последовательно наносят покрытие CuSn (рис. 7, и) и снимают фоторезист. После снятия фоторезиста сначала протравливают затравочный слой Cu влажным травителем, затем слой Ta плазмой сухим способом (рис. 7, к).

Встроенный мост (EMIB). Embedded Multi-die Interconnect Bridge (EMIB) — подход к соединению гетерогенных микросхем с высокой плотностью в корпусе.

В отрасли такое применение называется интеграцией корпусов 2,5D. Вместо большого полупроводникового промежуточного устройства, как в других 2.5D-методах, в EMIB используют очень маленький мостовой кристалл с несколькими слоями маршрутизации [18]. Этот мостовой кристалл внедрен как часть процесса изготовления подложки (рис. 8).

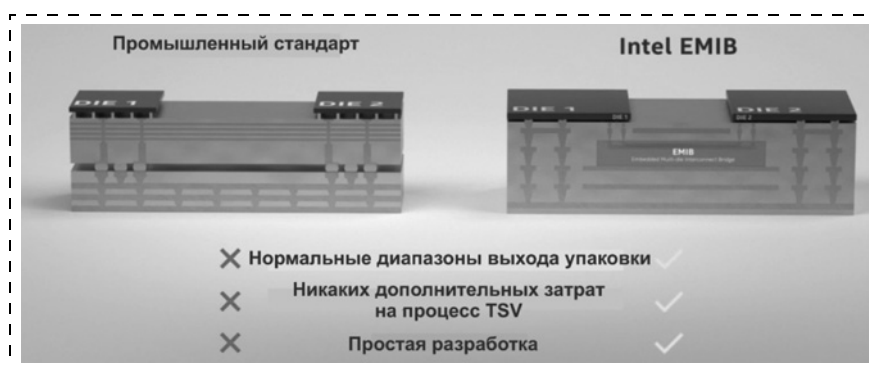


Рис. 8. Сравнение технологии EMIB с мировыми стандартами [18]

Современные методы изготовления корпусов требуют максимального количества соединений между кристаллами. Традиционные решения этой задачи подразделяют на 2,5D-решения с использованием полупроводникового промежуточного устройства и с использованием сквозных отверстий в полупроводнике (TSV) для соединения кристалла с так называемой полупроводниковой скоростью соединения при минимальной занимаемой площади. Результатом становится все более сложная компоновка и технологии изготовления, которые задерживают передачу в производство и снижают показатели доходности.

Технология EMIB (Embedded Multi-Die Bridge), хотя и относительно новая, но появилась не вчера. Она позволяет объединять в одном модуле совершенно разные блоки. Например, в процессорах Kabu Lake G подобным образом соединены GPU и память HBM.

В архитектуре EMIB тонкий кремниевый мост с четырьмя металлическими слоями и одним слоем контактной площадки встроен в два верхних слоя органического корпуса и действует как локализованное межсоединение между двумя кристаллами [19].

Встроенный мост соединяется с контактными площадками флип-чипа на подложке корпуса с помощью сквозных переходных отверстий в двух верхних слоях. Эта способность обеспечивать несколько локализованных межсоединений без использования сквозных кремниевых переходных отверстий является неотъемлемой областью и преимуществом стоимости технологии EMIB по сравнению с другими технологиями плотной многочиповой упаковки (MCP). EMIB позволяет интегрировать несколько кристаллов, так что общая

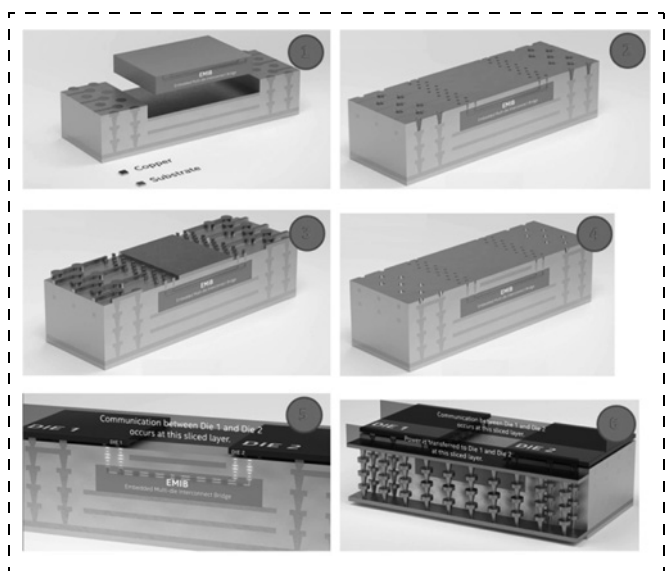


Рис. 9. Технологический процесс изготовления EMIB [18]

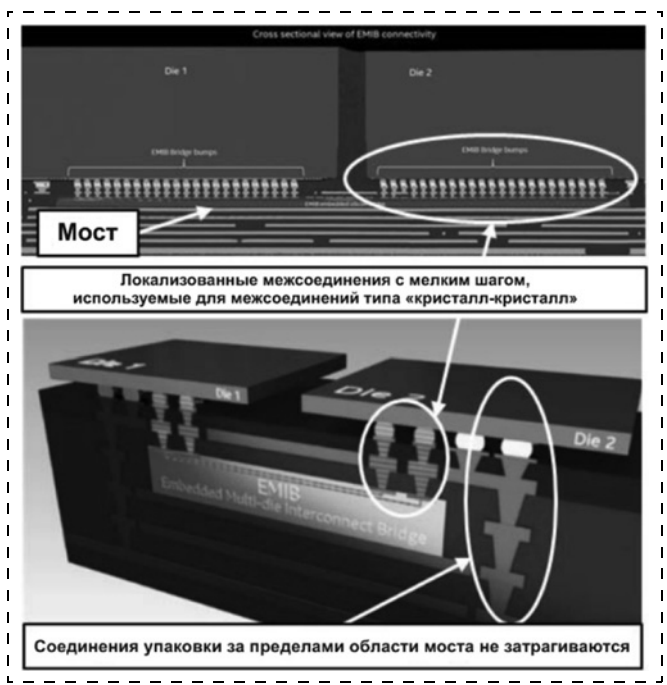


Рис. 10. Структура встроенного моста (EMIB) [19]

площадь кристаллов, подключенных к корпусу, значительно больше, чем размер сетки, и не так ограничена пределами сетки, как технологии кремниевых переходников. За исключением участков перемычек высокой плотности, на остальные межсоединения между кристаллом и корпусом и на структуру подложки корпуса перемычки не влияют (рис. 9).

Таким образом, в отличие от кремниевого интерпозера, электрический путь не подвергается неблагоприятному воздействию. Кроме того, процесс сборки EMIB имеет на один шаг меньше, чем процесс сборки кремниевого интерпозера. Однако процесс EMIB увеличивает сложность изготовления подложки и, в отличие от кремниевого промежуточного элемента, должен учитывать большее несоответствие коэффициентов теплового расширения кристалла и корпуса, что аналогично нынешней органической упаковке [20]. Поскольку кремниевый мост сам по себе небольшой и тонкий, он не оказывает влияния на термомеханическое напряженное состояние упаковки, а структура упаковки соответствует всем условиям надежности, таким же которым соответствуют традиционные органические упаковки (рис. 10). Кроме того, поскольку мост заключен в полимерный материал, он защищен от воздействия термомеханических напряжений, вызванных КТР. В последние годы наблюдается значительный интерес к сверхплотным органическим технологиям с тонкими линиями и промежутками, которые также не должны учитывать увеличение длины электрического пути.

Производство встроенного моста включает в себя производственную внутреннюю обработку, утонение пластин и нарезание на кристаллы. Мостовые пластины утоняют, чтобы обеспечить их размещение в двух верхних слоях органической упаковки [21]. Органическая упаковка следует стандартному производственному процессу, пока не будет нанесен последний внешний слой. На этом этапе кристалл кремниевого моста помещают в полость внутри корпуса и наносят последние слои диэлектрика. Прецизионные переходные отверстия с малым шагом формируют в области моста наряду с переходными отверстиями с большим шагом в областях, не являющихся мостом. Затем формируют открытые контактные площадки корпуса для создания межсоединения первого уровня (FLI), т. е. присоединяют микросхему. Два кристалла скрепляют с помощью процесса термокомпрессионного соединения [22]. Развитие процесса EMIB потребовало значительных инноваций в области контроля толщины диэлектрика, однородности покрытия и метрологии процесса, чтобы обеспечить высокопроизводительный процесс сборки с малым шагом.

Гибридный бондинг. Безударные межсоединения обеспечивают прямые вертикальные электрические межсоединения высокой плотности с очень коротким расстоянием между трехмерными стекловыми чипами или пластинами [23, 24]. В то же время область диэлектрической пассивации (например, оксид/нитрид, полимерные клеи) должна быть скреплена так, чтобы повысить прочность склеивания, рассеивание теплоты и защиту от коррозии меди с помощью бесшовной границы раздела (рис. 11). Хотя такое гибридное соединение металлов и диэлектрических материалов исследовали, например, с помощью комбинаций Au/адгезив, Au/SiO₂ и Cu—Sn/адгезив, гибридное соединение Cu/SiO₂ и Cu/адгезив является наиболее многообещающим вариантом для получения высоких электрических напряжений. Методы, используемые для гибридного связывания Cu/SiO₂ и Cu/адгезив, различаются ввиду различных механизмов связывания SiO₂—SiO₂ и полимерного адгезионного связывания. Связывание SiO₂—SiO₂ обычно основано

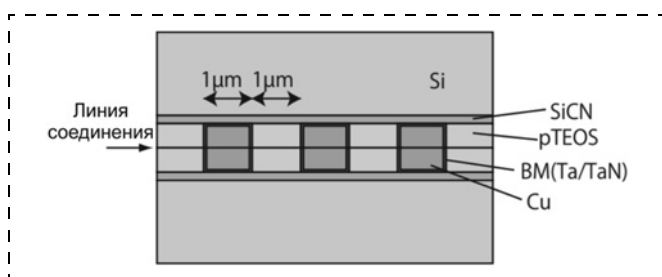


Рис. 11. Схематическое изображение гибридной структуры интерфейса склеивания [23]

на механизме гидрофильного соединения, который требует гидрофильной модификации поверхности перед связыванием; для склеивания обычно используют термореактивные полимерные клеи, например, бензоциклобутен (BCB), полиимид (PI) и полибензоксазол (PBO), а для обеспечения межсоединений используют TSV, заполненные металлом.

На стандартные Si-пластины размером 300 мм нанесен слой SiO₂ с использованием плазменного химического осаждения из паровой фазы (PECVD) [25]. Для металлизации структуры Cu толщиной ~500 нм были нанесены с использованием простого дамасского процесса, включая TaN/Ta в качестве слоя диффузионного барьера (рис. 12 и рис. 13, см. четвертую сторону обложки). Подушечки из Cu квадратной формы размером от 3,3 до 5,4 мкм были структурированы с шагом 7...10 мкм. Была проведена специальная обработка поверхности для получения шероховатости, подходящей для прямого соединения ($R_q < 0,5$ нм) на поверхностях SiO₂. Весь технологический процесс, включая процессы осаждения (1—3), структурирование диэлектрического слоя (4, 5), металлизацию (6, 7), выравнивание поверхности (8, 9) и процесс соединения (10, 11), показан на рис. 12 (см. четвертую сторону обложки) [25].

Подробное изображение поперечного сечения окончательно связанных гибридных пластин Cu/SiO₂ с небольшим и очень приемлемым переколом показано на рис. 13 (см. четвертую сторону обложки). Из схематической иллюстрации можно увидеть, что Cu окружен слоем TaN/Ta — диффузионным барьерным слоем. Кроме того, SiN (зеленый) использовали в качестве ограничителя травления.

Сквозные канавки в кремнии (TSV). Развитие технологии ИС обусловлено необходимостью повышения производительности и функциональности при одновременном уменьшении размера, массы, энергопотребления и стоимости производства. Постоянное стремление соответствовать этим требованиям привело к появлению множества небольших, инновационных и экономичных упаковочных технологий. Большинство передовых технологий упаковки можно разделить на два типа: систему на кристалле (SoC) и систему в упаковке (SiP). SiP имеет несколько преимуществ по сравнению с SoC: меньшая занимаемая площадь корпуса; использование существующих высокопроизводительных кристаллов; более быстрое время вывода на рынок, более низкая стоимость каждой функции и более гибкое обновление продукта [26, 27].

Интеграция TSV, классифицируемая как самая передовая технология SiP (System in Package), полагают позволяет устройствам удовлетворять трем основным требованиям: форм-фактору; про-

изводительности; стоимости за счет кратчайших и наиболее распространенных межсоединений между устройствами [28]. TSV представляет собой структуру, обеспечивающую электрический путь через толщину Si-пластины между контактной площадкой на одной поверхности и площадкой на другой стороне. Канал, контактные площадки и площадки электрически изолированы от подложки Si. На рис. 14 показаны различные типы Cu TSV, образованные гальваническим покрытием, такие как футеровка переходных отверстий тонкой медью, полное заполнение переходного отверстия и полное заполнение с образованием подушек [29].

Методы изготовления TSV структур. Структура и расположение TSV по отношению к транзисторам и внутренней сборке межсоединений в типичной пластине схематично показаны на рис. 15.

При создании TSV обычно выполняют следующие шаги:

- фоторезист наносят на кремниевую пластину, и литографическую экспозицию используют для определения местоположения TSV;
- кремний протравливают, как правило, с применением Bosch-процесса, который использует несколько последовательностей травления и покрытия для создания сквозных отверстий;
- затем фоторезист снимают и поверхность пластины очищают;
- внутренние стенки TSV покрыты диэлектрическим слоем (обычно SiO_2 , хотя также сообщалось [30] о Si_3N_4 с использованием термического окисления или PECVD (плазменное химическое осаждение из паровой фазы)). Слой электрически изолирует TSV от объемного кремния;
- далее на внутреннюю сторону TSV добавляют адгезионный слой, обычно Ti или Ta, с использованием PVD (физического осаждения из паровой фазы);
- затем в переходное отверстие наносят тонкий проводящий затравочный слой, и переходные отверстия готовы для нанесения металла TSV;
- электрохимическое осаждение (ECD) (т. е. гальваническое покрытие) используют для заполнения сквозных отверстий медью (Cu) или вольфрамом (W);

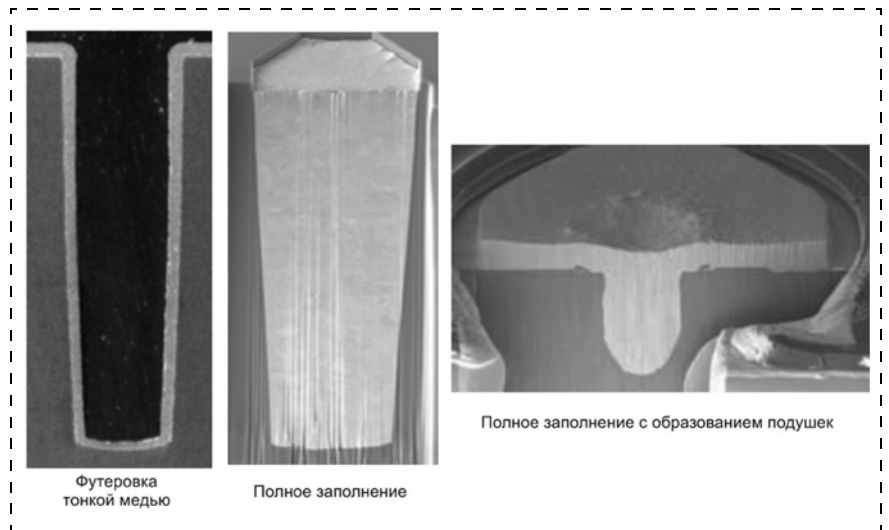


Рис. 14. Различные Cu TSV, сформированные гальваническим способом [30]

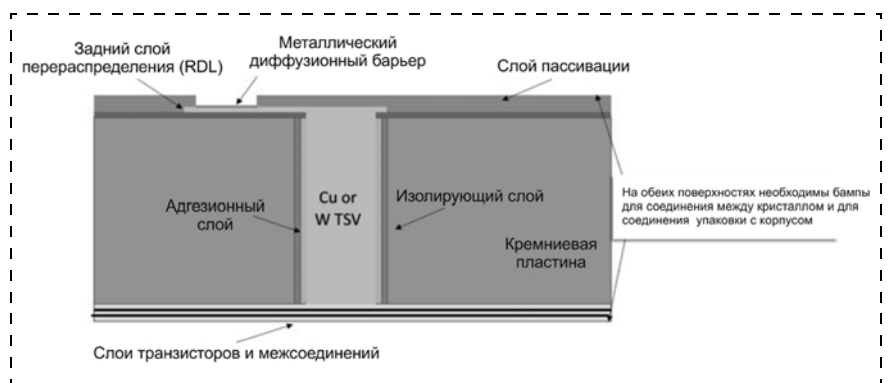


Рис. 15. Схематичное изображение TSV-структуры

- переходные отверстия отжигают для стабилизации микроструктуры TSV и снятия напряжений внутри TSV;
- наконец, химико-механическую полировку (CMP) используют для выравнивания пластины и удаления нежелательных материалов. TSV обычно производят с использованием трех различных процессов (рис. 16).

1. **Via First** (также называемый Front-End of Line (FEOL) Via Process). В этом процессе TSV создают до создания транзисторов [31].

Ключевые шаги в этом процессе:

- а) поверхность пластины сформирована, а TSV протравлены и заполнены на стороне транзистора (передняя или активная сторона) пластины;
- б) после формирования TSV пластину планаризируют и подготавливают для создания транзистора;
- в) за созданием транзистора следует процесс *Back End of Line* (BEOL), который создает несколько слоев металла / изолятора на кремниевой пластине;
- г) наконец, задняя сторона пластины утончается, чтобы обнажить переходные отверстия и создать слой перераспределения (RDL) (рис. 16).

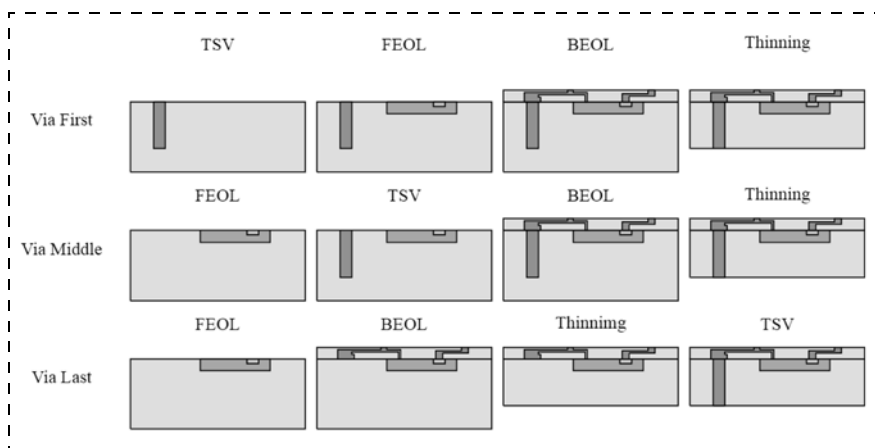


Рис. 16. Три высокоуровневых процесса создания TSV

Важным преимуществом подхода Via First является то, что, поскольку переходные отверстия выполняют до создания транзистора, пластины можно проверять и тестировать, и для последующих шагов будут использованы только известные исправные пластины с бездефектными TSV. Ключевым ограничением подхода Via First является то, что все материалы и процессы TSV должны быть совместимыми с процессами и температурами CMOS (~1200 °C) (рис. 17).

2. **Via Middle** (также называется Mid-End of Line (MEOL) Via Process). В этом процессе TSV формируют после создания внешнего устройства и до создания всех внутренних металлических слоев [32, 33].

Ключевые шаги в этом процессе:

- а) изготавливают устройства, включая транзисторы и несколько нижних металлических слоев;
- б) затем TSV создают со стороны активного устройства, как правило, при температурах в пределах 400...450 °C;

(необязательно) сопровождается созданием слоя перераспределения (RDL) и процессов формирования выступов на задней стороне, что является критической структурой для укладки кристаллов.

Помимо использования переходных отверстий на основе Cu, преимуществом процесса Via Middle является то, что последующая температура обработки при изготовлении кристалла ниже, чем для процесса перехода через первый переходной канал, и, следовательно, тепловые напряжения, индуцируемые в кремнии вследствие несоответствия КТР между кремнием и TSV-металлизацией, ниже.

3. **Via Last** (также называемый Back-End of Line (BEOL) Via Process). В этом процессе TSV создают после изготовления транзисторов и межсоединений [34].

Ключевые шаги в этом процессе:

- а) сначала создают транзисторы и выполняют весь процесс BEOL;
- б) пластину временно прикрепляют к носителю с помощью клея (обычно называемого клеем для

в) после этого TSV покрывают Cu или W;

г) на следующем шаге пластину отжигают при ~400 °C для снятия напряжений в TSV и стабилизации металлической структуры TSV;

д) пластину выравнивают с помощью типичного процесса дамасского покрытия и готовят к оставшейся металлизации BEOL;

е) после завершения металлизации BEOL пластину устанавливают на носителе и утоняют, чтобы открыть TSV на неактивной (задней стороне) пластины. Открытие переходных отверстий обычно

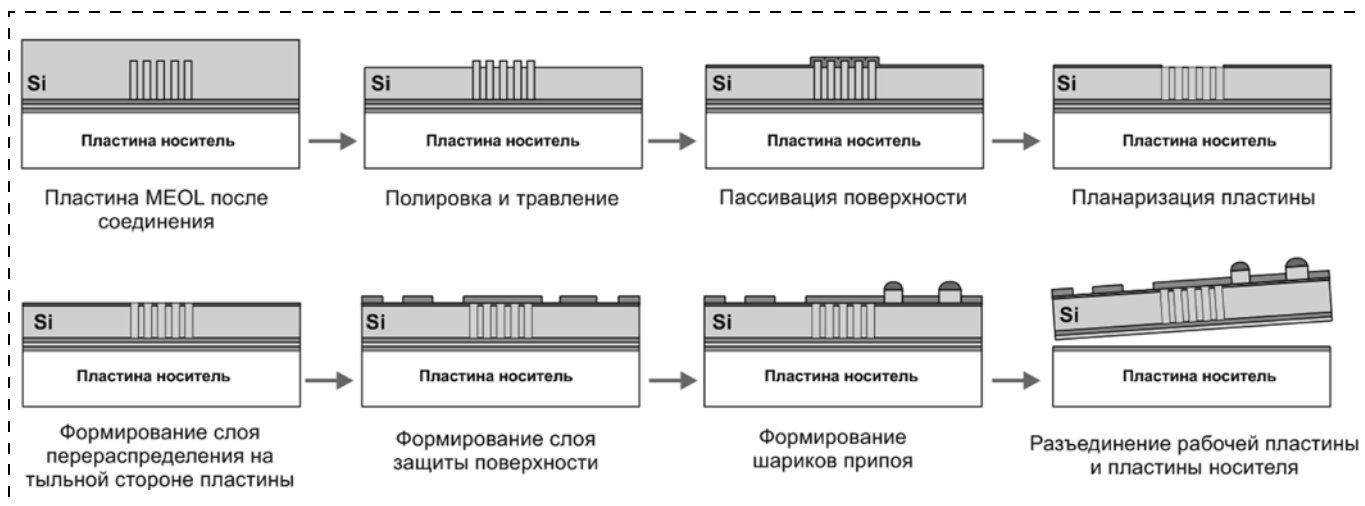


Рис. 17. Технологический bump-процесс после образования TSV, показанный для процесса MEOL/FEOL TSV

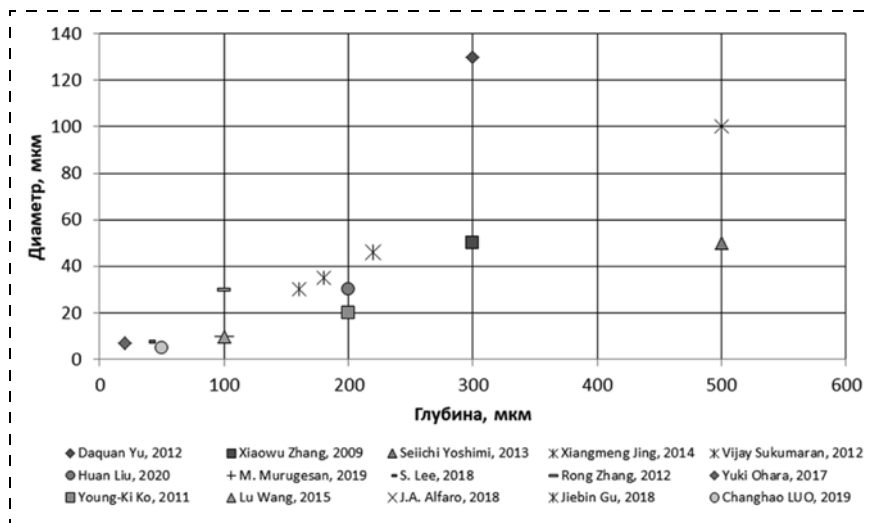


Рис. 18. Значения аспектного соотношения сквозных канавок за последние 15 лет (из опубликованных работ)

крепления пластин / отслаивания пластин) на активной (лицевой) стороне;

в) пластину утоняют, и TSV формируют с использованием процесса, аналогичного процессу Via Middle, описанному ранее. Затем следует изготовление RDL и задних отбойников; задняя сторона RDL и процесс столкновения по существу такие же, как описано на рис. 16.

В процессе Via Last температура обработки TSV обычно ниже 200 °С. Это важно, поскольку полностью сформированную пластину закрепляют на носителе с помощью низкотемпературного клея. Преимущество этого подхода состоит в том, что проблемы с тепловым напряжением ниже, чем с вариантами процесса Via First и Via Middle.

Ключевыми характеристиками конструкции TSV являются: диаметр; шаг; аспектное соотношение сторон (то есть отношение диаметра TSV к его глубине); электрические характеристики (включая удельное сопротивление как TSV, так и соседнего кремния, индуктивность и частотно-зависимую емкость); напряжения защитной зоны (KOZ's). На соотношение сторон TSV влияют несколько ключевых параметров, таких как способность получения хорошего изоляционного покрытия в зависимости от глубины переходного отверстия, и способность избавления от пустот через заполнение. На рис. 18 приведены некоторые из опубликованных данных по диаметрам и глубине TSV-структур за последние 15 лет.

Виды дефектов в TSV-структурах. Процесс изготовления и соединения TSV может приводить к появлению многих типов дефектов, таких как пустоты TSV, отслаивание в TSV, микрошарики в оксиде, пустоты и трещины в микровыступах и т. д. [35]. Ввиду жестких электромагнитных условий в трехмерных ИС эти дефекты могут привести к ко-

ротким замыканиям, размыканием, ошибкам задержки, сбоям, вызванным перекрестными помехами, и сбоям в межсоединениях, а также вызвать различные проблемы с выходом и надежностью.

Дефекты могут появляться разных видов на разных этапах обработки и располагаться в разных местах соединений. Например, гальваническое покрытие медью или недостаточное смачивание переходных отверстий в растворе для нанесения покрытия может привести к беспорядочно распределенным пустотам в TSV [36]. Надежность TSV также может быть снижена вследствие напряжения, вызванного несоответствием коэффициента теплового расширения

между Cu, Si и SiO₂ [37]. Однако деформации вокруг медных переходных отверстий могут быть недостаточно сильными, чтобы вызвать некорректную работу в структурах TSV-RDL, сочетание этих деформаций и производственных дефектов в TSV может привести к сбоям, таким как межфазное расслоение, микровыступы и трещины RDL, а также трещины в TSV [38]. Кроме того, электромиграция приводит к образованию пустот и трещин, особенно в местах стыков [39]. Как правило, упомянутые выше дефекты можно разделить на два типа в зависимости от их местоположения: дефекты, случайно распределенные в TSV, и дефекты в соединениях TSV-RDL или TSV-микробампы, как показано на рис. 19.

Таким образом, два типа дефектов по-разному влияют на электромагнитные свойства межсоеди-

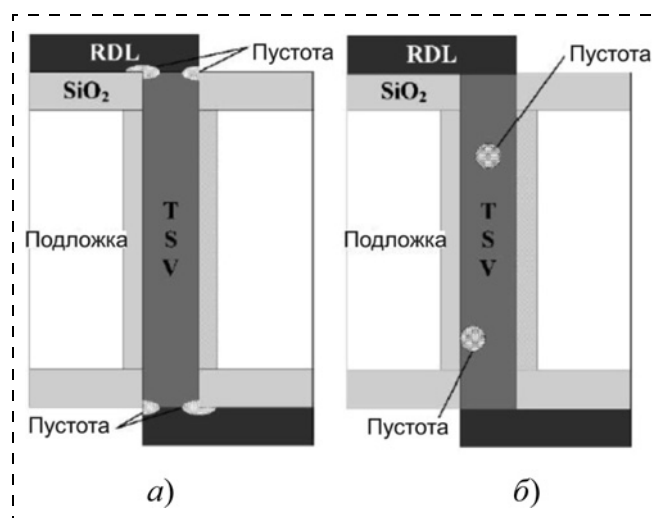


Рис. 19. Два типа дефектов в структуре TSV-RDL: а — дефект на стыке TSV-RDL; б — дефект в TSV [36]

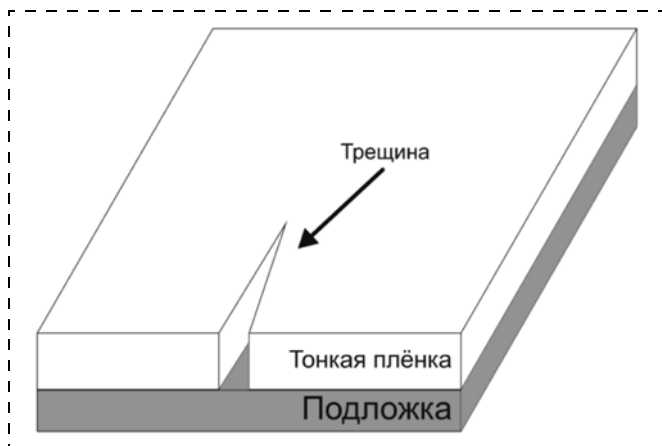


Рис. 20. Трещина в тонкой пленке, лежащей на поверхности подложки

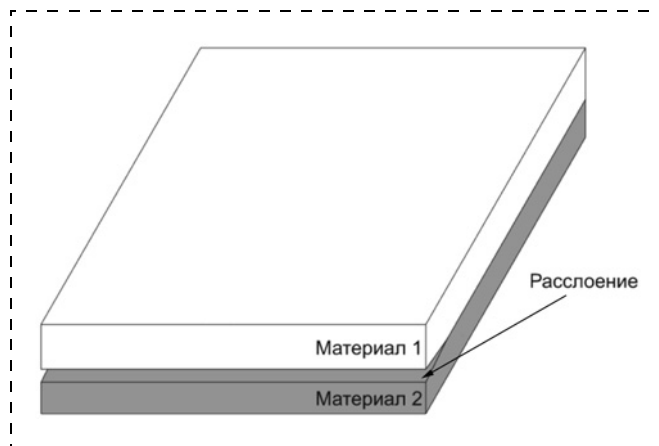


Рис. 21. Расслоение между двумя материалами

нений, что позволяет классифицировать дефекты в структурах TSV.

Растрескивание. Вследствие процесса осаждения и использования термических процессов тонкие пленки часто находятся в состоянии двухосного напряжения. Этот избыток энергии в пленке может вызвать распространение трещины. Дефект в пленке может служить источником зарождения трещин. Трещина может проходить по толщине пленки и часто останавливается на границе раздела, не затрагивая границу раздела и подложку. В пленке трещина расширяется в сторону, пока не достигнет края пленки или пока не соединится с другой трещиной. Удлиненная трещина, известная как трещина канала, может быть больше толщины пленки (рис. 20). Возникновение и распространение трещин приводит к разрушению пленки и, как следствие, к разрыву цепи.

Расслоение. Расслоение может развиваться на границе раздела двух различных материалов. Обычно межфазная трещина зарождается в месте с высокой концентрацией напряжений, таком как свободный край пленки или геометрическое соединение либо стык материалов в структурированной структуре [2]. Остаточные напряжения в пленках могут быть причиной распространения межфазной границы трещины. На рис. 21 показан пример межфазной трещины.

Электромиграция. Во время работы межблочная линия может пропускать большой электрический ток. Вследствие этого высокого тока атомы металла перемещаются в направлении потока

электронов, вызывая износ металла межсоединения (рис. 22) [2]. Этот механизм износа обычно приводит к образованию пустот, которые увеличиваются и вызывают отказ работы устройства.

Дефекты, вызванные напряжением пустот: это относится к разрыву металлической линии или сквозного отверстия, возникающему при отсутствии тока. В результате нескольких термических циклов материал находится под различными напряжениями, которые могут вызвать рост пустот, как показано на рис. 23 [2]. В медных конструкциях это происходит вследствие высокотемпературной обработки. После термического процесса медь испытывает большое растягивающее напряжение ввиду несоответствия КТР используемых материалов, поэтому напряжение со временем спадает за счет диффузии атомов и, таким образом, за счет образования пустот [41].

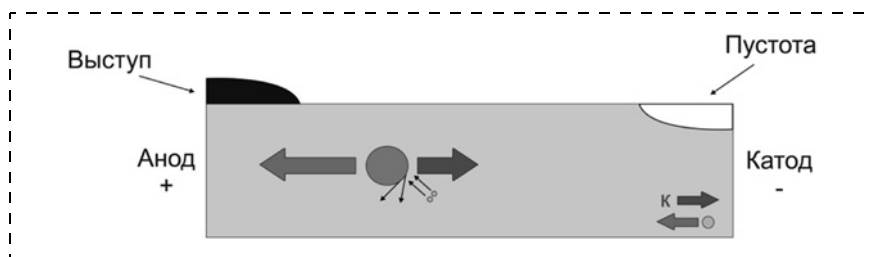


Рис. 22. Схематическое изображение явления электромиграции

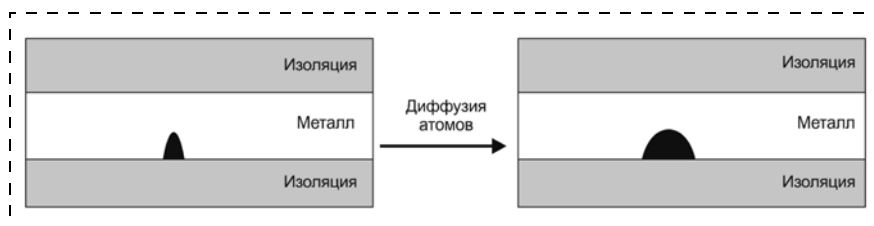


Рис. 23. Пустоты, образованные вследствие высокого напряжения, которые приводят к обрыву цепи

Заключение

Со времени изобретения интегральных схем было сделано много прорывных решений в технологии микросборки полупроводниковых пластин. Постоянный интерес связан с тенденцией уменьшения размеров межсоединений как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Вследствие наноразмерных эффектов в горизонтальной плоскости стоимость технологических операций выросла в несколько раз за последние 10 лет. Поэтому производители начали активно искать решения и переходить от двухмерной интеграции (2D) к трехмерной (3D), в которой используются микрометровые линейные размеры. В результате появилась тенденция увеличения числа кристаллов с единицы площади при аналогичной проектной норме. Однако при этом возникает негативный эффект: с увеличением диаметра пластины увеличивается ее толщина, а значение рабочего слоя в подавляющем большинстве случаев не превышает нескольких микрометров. Таким образом, большой объем кремния не выполняет активную функцию, при этом занимает полезную площадь микросборки из нескольких кремниевых пластин. Для удаления неиспользуемого материала применяют операции шлифовки и полировки. Для временно-го увеличения жесткости утоненной пластины используют технологию временного адгезивного бондинга. Осуществить процесс микросборки можно существующими видами интеграции: 2D-интеграция; 2.5D-интеграция; 3D-интеграция; интеграция с помощью сквозных канавок в кремнии (TSV), интеграция посредством микробампов, интеграция с помощью встроенного кремниевого моста (EMIB), гибридный бондинг.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП "МСТ и ЭКБ" МИЭТ при поддержке Фонда содействия инновациям по договору № 418ГР/57264 от 26.12.2019.

Список литературы

1. **Lécuyer C., Brock D. C.** Makers of the microchip: A documentary history of fairchild semiconductor. MIT Press. 2010. P. 1178—1179.
2. **Garrou P., Bower C., Ramm P.** (ed.). Handbook of 3D integration, volume 1: technology and applications of 3D integrated circuits. Wiley-VCH. 2011. P. 25—40.
3. **Bruce R. H., Meuli W. P., Ho J.** Multi chip modules // 26th ACM/IEEE Design Automation Conference. IEEE Computer Society, 1989. P. 389—393.
4. **Patti R. S.** Three-dimensional integrated circuits and the future of system-on-chip designs // Proceedings of the IEEE. 2006. Vol. 94, N. 6. P. 1214—1224.
5. **Tai K. L.** System-In-Package (SIP): challenges and opportunities // Proceedings 2000. IEEE Design Automation Conference. 2000. P. 191—196.
6. https://en.wikipedia.org/wiki/2.5D_integrated_circuit
7. <https://www.eetimes.com/2d-vs-2-5d-vs-3d-ics-101/>

8. **Zhang X., Lin K. J., Wickramanayaka S., et al.** Heterogeneous 2.5 D integration on through silicon interposer // Applied physics reviews. 2015. Vol. 2, N. 2. P. 8—13.
9. **Stow D., Akgun I., Barnes R., et al.** Cost and thermal analysis of high-performance 2.5 D and 3D integrated circuit design space // IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI). 2016. P. 637—642.
10. **Matthias T., Wimplinger M., Pargfrieder S., et al.** 3D Process Integration — Wafer-to-Wafer and Chip-to-Wafer Bonding // MRS Online Proceedings Library (OPL). 2006. Vol. 970. P. 1—7.
11. **Caro A. M., Travalay Y., Maes G., et al.** Enabling Cu—Cu connection in (dual) damascene interconnects by selective deposition of two different SAM molecules // IEEE International Interconnect Technology Conference. 2011. P. 1—3.
12. **Reif R., Tan C. S., Fan A., et al.** 3-D interconnects using Cu wafer bonding: Technology and applications // Advanced Metallization Conference, San Diego. 2002. P. 1—7.
13. <https://www.realworldtech.com/3d-integration/6/>
14. https://en.wikipedia.org/wiki/Three-dimensional_integrated_circuit
15. https://en.wikipedia.org/wiki/Solder_ball#cite_note-indiumcorporation-2
16. **Lim S. P. S., Rao V. S., Hnin W. Y., et al.** Process development and reliability of microbumps // IEEE transactions on Components and Packaging Technologies. 2010. Vol. 33, N. 4. P. 747—753.
17. **Yu A., Lau J. H., Ho S. W., et al.** Study of 15µm pitch solder microbumps for 3D IC integration // IEEE 59th Electronic Components and Technology Conference. 2009. P. 6—10.
18. <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/silicon-innovations/6-pillars/emib.html>
19. **Mahajan R., Qian Z., Viswanath R. S., et al.** Embedded multichip interconnect bridge—A localized, high-density multichip packaging interconnect // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2019. Vol. 9, N. 10. P. 1952—1962.
20. **Viswanath R., Chandrasekhar A., Srinivasan S., et al.** Heterogeneous SoC integration with EMIB // IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium (EDAPS). 2018. P. 1—3.
21. **Lin J., Chung C. K., Lin C. F., et al.** Scalable chiplet package using fan-out embedded bridge // IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). 2020. P. 14—18.
22. **Eitan A., Hung K. Y.** Thermo-Compression Bonding for fine-pitch copper-pillar flip-chip interconnect-tool features as enablers of unique technology // IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). 2015. P. 460—464.
23. **Suga T.** Feasibility of surface activated bonding for ultra-fine pitch interconnection—A new concept of bump-less direct bonding for system level packaging // 2000 Proceedings. IEEE 50th Electronic Components and Technology Conference. 2000. P. 702—705.
24. **Suga T., Otsuka K.** Bump-less interconnect for next generation system packaging // 2001 Proceedings. IEEE 51st Electronic Components and Technology Conference. 2001. P. 1003—1008.
25. **Rebhan B., Bernauer M., Wagenleitner T., et al.** <200 nm Wafer-to-wafer overlay accuracy in wafer level Cu/SiO₂ hybrid bonding for BSI CIS // IEEE 17th Electronics Packaging and Technology Conference (EPTC). 2015. P. 1—4.
26. **Garrou P. E., Vardaman E. J.** 3D integration at the wafer level // TechSearch International. 2011. P. 4—8.
27. **Eloy J. C.** 3D TSV Interconnects: Devices and Systems—2008 Report // Yole Development, Lyon, France. 2008. P. 5—13.
28. **Kim B., Sharbono C.** Void-free Cu filling within high aspect ratio TSVs // Proc. EMC-3D Technical Symposium at Japan and Korea. 2007. P. 838—843.

29. **Bauer T. M., Shinde S. L., Massad J. E., et al.** Front end of line integration of high density, electrically isolated, metallized through silicon vias // IEEE 59th Electronic Components and Technology Conference. 2009. P. 1165–1169.

30. **Puech M., Thevenoud J. M., Gruffat J. M., et al.** Fabrication of 3D packaging TSV using DRIE // IEEE Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS. 2008. P. 109–114.

31. **Na D. J., Aung K. O., Choi W. K., et al.** TSV MEOL (Mid End of Line) and packaging technology of mobile 3D-IC stacking // IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). 2014. P. 596–600.

32. **Beyne E.** Reliable via-middle copper through-silicon via technology for 3-D integration // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2015. Vol. 6, N. 7. P. 983–992.

33. **Ikeda H.** Heterogeneous 3D stacking technology developments in ASET // 2nd IEEE CPMT Symposium Japan. 2012. P. 1–4.

34. **Chakrabarty K., Deutsch S., Thapliyal H., et al.** TSV defects and TSV-induced circuit failures: The third dimension in test and design-for-test // IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). 2012. P. 5–12.

35. **Malta D., Gregory C., Tample D., et al.** Integrated process for defect-free copper plating and chemical-mechanical polishing of through-silicon vias for 3D interconnects // 2010 Proceedings IEEE 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). 2010. P. 1769–1775.

36. **Lee G., Jeon S., Byun K., et al.** Mechanical characterization of residual stress around TSV through instrumented indentation algorithm // IEEE International 3D Systems Integration Conference (3DIC). 2011. P. 1–6.

37. **Lu K. H., Ryu S. K., Im J., et al.** Thermomechanical reliability of through-silicon vias in 3D interconnects // IEEE International reliability physics symposium. 2011. P. 1–7.

38. **Lin Y. M., Zhan C. J., Juang J. Y., et al.** Electromigration in Ni/Sn intermetallic micro bump joint for 3D IC chip stacking // IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC). 2011. P. 351–357.

39. <https://www.iue.tuwien.ac.at/phd/papaleo/Mainch1.html>

40. **Changhao L. U. O., Kai Z., Sun X., et al.** Detection and Classification of Typical Defects in TSV and RDL // IEEE 20th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). 2019. P. 1–4.

V. A. Bespalov¹, D. Sci., Rector, e-mail: rector@miet.ru, **E. E. Gusev²**, Ph. D., Leading Engineer, bubbledouble@mail.ru, **N. A. Djuzhev¹**, Ph. D., Director of the Center for Collective Use "MST and EKB", e-mail: djuzhev@ckp-miet.ru, **P. S. Ivanin¹**, Engineer, e-mail: ivanin@ckp-miet.ru, **M. A. Makhboroda²**, Ph. D., General Director, e-mail: m.makhboroda@gmail.com

¹ National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation

² LLC "Sensor Micron", Moscow, 107045, Russian Federation

Corresponding author:

Ivanin Pavel S., Engineer, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation
e-mail: ivanin@ckp-miet.ru

Review of existing microassembly methods

Received on October 1, 2021

Accepted on November 22, 2021

Three-dimensional integration, which improves the performance of an integrated circuit by reducing die area and decreasing signal latency, is made possible by through-holes in silicon (TSV). Combining ICs in a micro-assembly and tightly connecting them vertically solves the problem with efficiency. Due to the need to minimize the characteristics of the microcircuit level, the number of transistors per unit area continues to increase. All IC components must be electrically connected to ensure proper operation. Over the years, various IP architectures have been developed to keep the path of miniaturization going. This article focuses on existing microassembly methods, ranging from two-dimensional integration (2D) to three-dimensional (3D).

Keywords: 2D Integration, 2.5D Integration, 3D Integration, Through Silicon Vias integration (TSV), Micro-Relief integration, Embedded Silicon Bridge (EMIB) Integration, Hybrid Bonding, Micro-assembly, Integrated Circuits

For citation:

Bespalov V. A., Gusev E. E., Djuzhev N. A. et al. Review of Existing Microassembly Methods, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 124–136.

DOI: 10.17587/nmst.24.124-136

References

1. **Lécuyer C., Brock D. C.** Makers of the microchip: A documentary history of fairchild semiconductor, *MIT Press*, 2010, pp. 1178—1179.
2. **Garrou P., Bower C., Ramm P.** (ed.). Handbook of 3D integration, I: technology and applications of 3D integrated circuits, *Wiley-VCH*, 2011, pp. 25—40.
3. **Bruce R. H., Meuli W. P., Ho J.** Multi chip modules, *26th ACM/IEEE Design Automation Conference, IEEE Computer Society*, 1989, pp. 389—393.
4. **Patti R. S.** Three-dimensional integrated circuits and the future of system-on-chip designs, *Proceedings of the IEEE*, 2006, vol. 94, no. 6, pp. 1214—1224.
5. **Tai K. L.** System-In-Package (SIP): challenges and opportunities, *Proceedings 2000, IEEE Design Automation Conference*, 2000, pp. 191—196.
6. https://en.wikipedia.org/wiki/2.5D_integrated_circuit
7. <https://www.eetimes.com/2d-vs-2-5d-vs-3d-ics-101/>
8. **Zhang X., Lin K. J., Wickramanayaka S., et al.** Heterogeneous 2.5 D integration on through silicon interposer, *Applied physics reviews*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 8—13.
9. **Stow D., Akgun I., Barnes R., et al.** Cost and thermal analysis of high-performance 2.5 D and 3D integrated circuit design space, *IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI)*, 2016, pp. 637—642.
10. **Matthias T., Wimplinger M., Pargfrieder S., et al.** 3D Process Integration — Wafer-to-Wafer and Chip-to-Wafer Bonding, *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 2006, vol. 970, pp. 1—7.
11. **Caro A. M., Travalay Y., Maes G., et al.** Enabling Cu-Cu connection in (dual) damascene interconnects by selective deposition of two different SAM molecules, *IEEE International Interconnect Technology Conference*, 2011, pp. 1—3.
12. **Reif R., Tan C. S., Fan A., et al.** 3-D interconnects using Cu wafer bonding: Technology and applications, *Advanced Metallization Conference, San Diego*, 2002, pp. 1—7.
13. <https://www.realworldtech.com/3d-integration/6/>
14. https://en.wikipedia.org/wiki/Three-dimensional_integrated_circuit
15. https://en.wikipedia.org/wiki/Solder_ball#cite_note-indiumcorporation-2
16. **Lim S. P. S., Rao V. S., Hnin W. Y., et al.** Process development and reliability of microbumps, *IEEE transactions on Components and Packaging Technologies*, 2010, vol. 33, no. 4, pp. 747—753.
17. **Yu A., Lau J. H., Ho S. W., et al.** Study of 15 μ m pitch solder microbumps for 3D IC integration, *IEEE 59th Electronic Components and Technology Conference*, 2009, pp. 6—10.
18. <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/silicon-innovations/6-pillars/emib.html>
19. **Mahajan R., Qian Z., Viswanath R. S., et al.** Embedded multilayer interconnect bridge—A localized, high-density multi-chip packaging interconnect, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2019, vol. 9, no. 10, pp. 1952—1962.
20. **Viswanath R., Chandrasekhar A., Srinivasan S., et al.** Heterogeneous SoC integration with EMIB, *IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium (EDAPS)*, 2018, pp. 1—3.
21. **Lin J., Chung C. K., Lin C. F., et al.** Scalable chiplet package using fan-out embedded bridge, *IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2020, pp. 14—18.
22. **Eitan A., Hung K. Y.** Thermo-Compression Bonding for fine-pitch copper-pillar flip-chip interconnect-tool features as enablers of unique technology, *IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2015, pp. 460—464.
23. **Suga T.** Feasibility of surface activated bonding for ultra-fine pitch interconnection—A new concept of bump-less direct bonding for system level packaging, *2000 Proceedings. IEEE 50th Electronic Components and Technology Conference*, 2000, pp. 702—705.
24. **Suga T., Otsuka K.** Bump-less interconnect for next generation system packaging, *2001 Proceedings. IEEE 51st Electronic Components and Technology Conference*, 2001, pp. 1003—1008.
25. **Rebhan B., Bernauer M., Wagenleitner T., et al.** <200 nm Wafer-to-wafer overlay accuracy in wafer level Cu/SiO₂ hybrid bonding for BSI CIS, *IEEE 17th Electronics Packaging and Technology Conference (EPTC)*, 2015, pp. 1—4.
26. **Garrou P. E., Vardaman E. J.** 3D integration at the wafer level, *TechSearch International*, 2011, pp. 4—8.
27. **Eloy J. C.** 3D TSV Interconnects: Devices and Systems—2008 Report, *Yole Development, Lyon, France*, 2008, pp. 5—13.
28. **Kim B., Sharbono C.** Void-free Cu filling within high aspect ratio TSVs, *Proc. EMC-3D Technical Symposium at Japan and Korea*, 2007, pp. 838—843.
29. **Bauer T. M., Shinde S. L., Massad J. E., et al.** Front end of line integration of high density, electrically isolated, metallized through silicon vias, *IEEE 59th Electronic Components and Technology Conference*, 2009, pp. 1165—1169.
30. **Puech M., Thevenoud J. M., Gruffat J. M., et al.** Fabrication of 3D packaging TSV using DRIE, *IEEE Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*, 2008, pp. 109—114.
31. **Na D. J., Aung K. O., Choi W. K., et al.** TSV MEOL (Mid End of Line) and packaging technology of mobile 3D-IC stacking, *IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2014, pp. 596—600.
32. **Beyne E.** Reliable via-middle copper through-silicon via technology for 3-D integration, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2015, vol. 6, no. 7, pp. 983—992.
33. **Ikeda H.** Heterogeneous 3D stacking technology developments in ASET, *2nd IEEE CPMT Symposium Japan*, 2012, pp. 1—4.
34. **Chakrabarty K., Deutsch S., Thapliyal H., et al.** TSV defects and TSV-induced circuit failures: The third dimension in test and design-for-test, *IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, 2012, pp. 5—12.
35. **Malta D., Gregory C., Tample D., et al.** Integrated process for defect-free copper plating and chemical-mechanical polishing of through-silicon vias for 3D interconnects, *IEEE 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2010, pp. 1769—1775.
36. **Lee G., Jeon S., Byun K., et al.** Mechanical characterization of residual stress around TSV through instrumented indentation algorithm, *IEEE International 3D Systems Integration Conference (3DIC)*, 2011, pp. 1—6.
37. **Lu K. H., Ryu S. K., Im J., et al.** Thermomechanical reliability of through-silicon vias in 3D interconnects, *IEEE International reliability physics symposium*, 2011, pp. 1—7.
38. **Lin Y. M., Zhan C. J., Juang J. Y., et al.** Electromigration in Ni/Sn intermetallic micro bump joint for 3D IC chip stacking, *IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2011, pp. 351—357.
39. <https://www.iue.tuwien.ac.at/phd/papaleo/Mainch1.html>
40. **Changhao L. U. O., Kai Z., Sun X., et al.** Detection and Classification of Typical Defects in TSV and RDL, *IEEE 20th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, 2019, pp. 1—4.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.372

DOI: 10.17587/nmst.24.137-142

Д. А. Сарапульцев, инженер, e-mail: sarapulcev@mirea.ru,
А. А. Золоторев, канд. техн. наук, доцент, e-mail: zolotarev@mirea.ru,
М. Л. Цареградская, лаборант, e-mail: caregradskaya@mirea.ru
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
"МИРЭА — Российский технологический университет", Москва.

АНАЛИЗ И МАКЕТИРОВАНИЕ НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ СВЧ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ КАК SMD-КОМПОНЕНТА

Поступила в редакцию 13.12.2022

Описан расчет, моделирование и макетирование направленного ответвителя. В ходе работы проведен анализ рынка, разработана модель направленного ответвителя в диапазоне частот 2,9...4,5 ГГц, макет устройства и измерительной оснастки.

Направленные ответвители с различным переходным ослаблением широко применяют в составе распределительных цепей антенных решеток, а также для контроля мощности радиосигнала, распространяющегося в линии передачи, в измерителях мощности, системах автоматической регулировки усиления, радиоприемных устройствах и др.

Ключевые слова: направленный ответвитель, связанные линии, направленность, изоляция, ответвление, АЧХ, тандемное соединение

Изучение рынка показало, что на данный момент в России нет серийного производства направленных ответвителей (НО) как SMD-компонента. Было принято решение провести макетирование и анализ направленного ответвителя, чтобы оценить рентабельность отечественного производства такого устройства в рамках импортозамещения зарубежных аналогов, с улучшенными характеристиками.

Схемные решения, используемые для построения направленных ответвителей, выбирают в зависимости от конкретных технических требований к электрическим параметрам, диапазону рабочих частот и от возможностей технологической базы. Практически все многообразие структур НО, реализованных на элементах, является результатом модификации простейших структур. К основным видам направленных ответвителей

относятся шлейфные, одноступенчатые и НО на основе тандемного соединения (рис. 1).

В ходе моделирования выяснилось, что наиболее подходит для данной работы направленный ответвитель на основе тандемного соединения двух связанных линий передач с расположением линий передач на разных слоях многослойной печатной платы (МПП). Это обусловлено тем, что при моделировании НО с линиями передач на одном слое

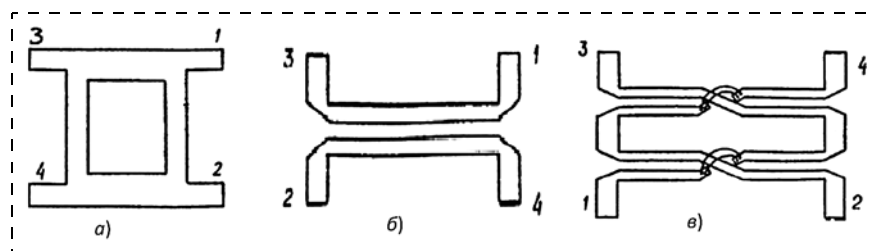


Рис. 1. Виды направленных ответвителей:

а — шлейфный; б — одноступенчатый; в — на основе тандемного соединения двух связанных линий передачи (1, 2, 3, 4 — плечи НО)

печатной платы зазор между этими линиями слишком мал (≈ 10 мкм), поэтому является сверхсложным для исполнения на микрополосковой структуре.

Тандемный микрополосковый направленный ответвитель представляет собой функциональный узел из двух идентичных микрополосковых ответвителей, содержащих две электромагнитно связанные линии передачи, сформированные параллельно друг другу на диэлектрической подложке и реализованные методами тонкопленочной технологии на стандартных подложках. За счет определенного порядка соединения полюсов этих ответвителей удается реализовать тандемный микрополосковый ответвитель с полосой пропускания 60...65 %. Однако эти два образующих ответвителя не должны иметь непосредственную электромагнитную связь между собой, что при практической реализации вынуждает разводить их на подложке на заметные

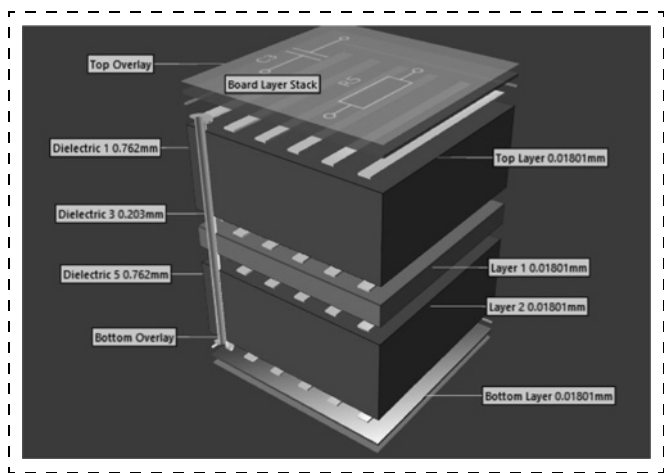


Рис. 2. Слои печатной платы

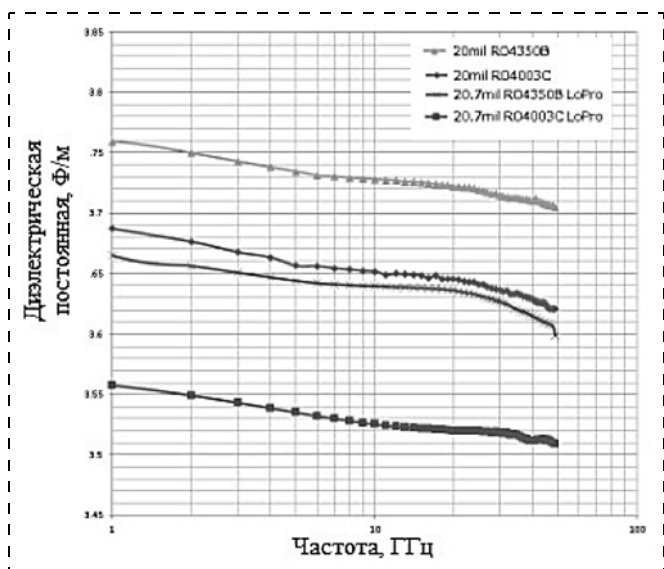


Рис. 3. Зависимость диэлектрической постоянной от частоты для различных диэлектрических материалов

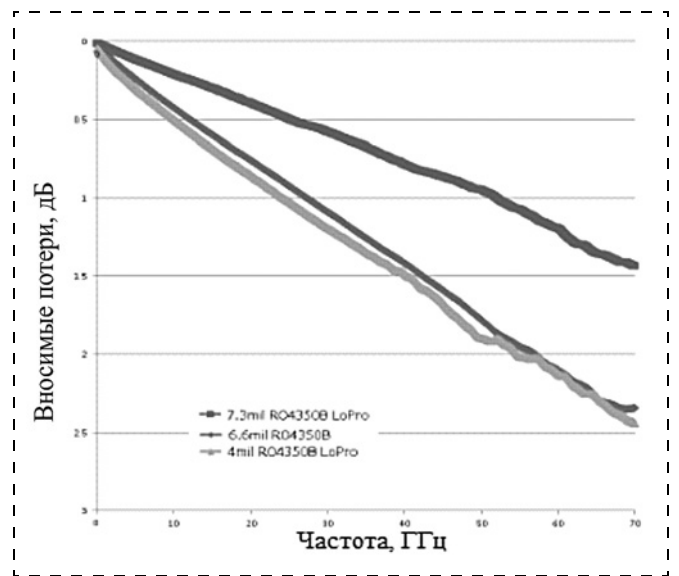


Рис. 4. Зависимость вносимых потерь от частоты для разных толщин диэлектрика RO4350B

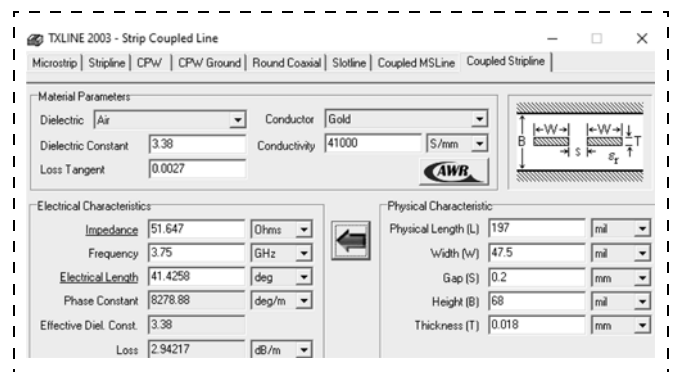


Рис. 5. Расчет толщины микрополосковых линий

расстояния. Это увеличивает габаритные размеры тандемного ответвителя в целом и ограничивает область его использования в высокочастотной технике.

Использование многослойной печатной платы позволяет уменьшить размеры, так как в этом случае линии передачи находятся на расстоянии друг от друга в вертикальной, а не горизонтальной плоскости, а расстояние между симметричными полосковыми линиями зависит от толщины препрега (рис. 2).

Выбор толщины и материала препрега влияет на вносимые потери, переходное ослабление, развязку и направленность, так как данные параметры связаны между собой формулой:

$$\text{Направленность} = \frac{\text{Развязка}}{\text{Переходное ослабление} \times \text{Вносимые потери}}$$

Помимо толщины на устройство влияет материал препрега (рис 3, 4).

В первую очередь, параметры препрега влияют на развязку и переходное ослабление, так как развязка является отношением мощности на входе первичной линии к мощности в нерабочем плече вторичной линии, а переходное ослабление — отношением входной мощности основной линии к мощности, ответвленной в рабочее плечо вспомогательной линии. Таким образом, необходимые характеристики можно получить путем изменения толщины препрега и его материала. При этом необходимо учитывать расстояние между полосками в горизонтальной плоскости. Чем ближе микрополоски в обеих плоскостях, тем лучше направленность, но хуже развязка.

Толщину микрополосковой линии рассчитывают исходя из структуры устройства (рис. 5).

На основе совокупности всех перечисленных выше фактов была разработана модель "тандемного" микрополоскового НО на многослойной печатной плате (рис. 6).

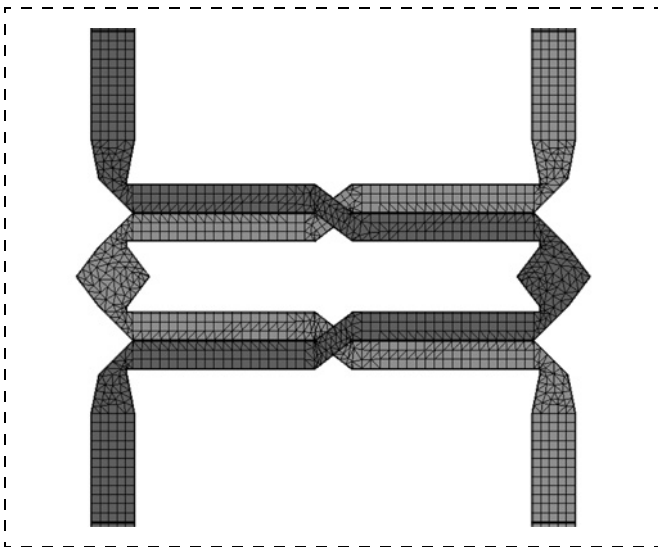


Рис. 6. 3D-модель направленного ответвителя

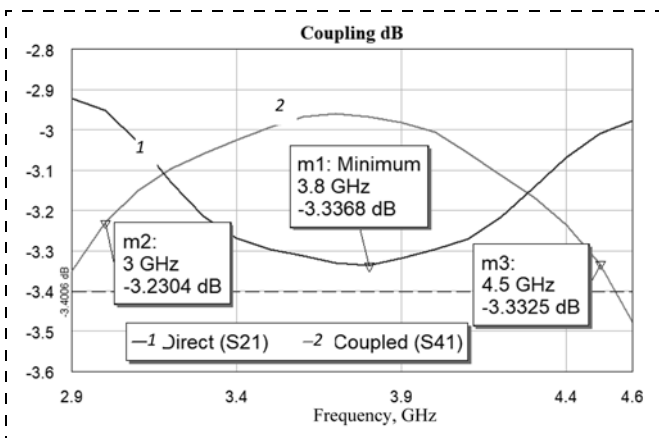


Рис. 7. АЧХ прямого $|S(21)|$ и связанного $|S(41)|$ плеча НО

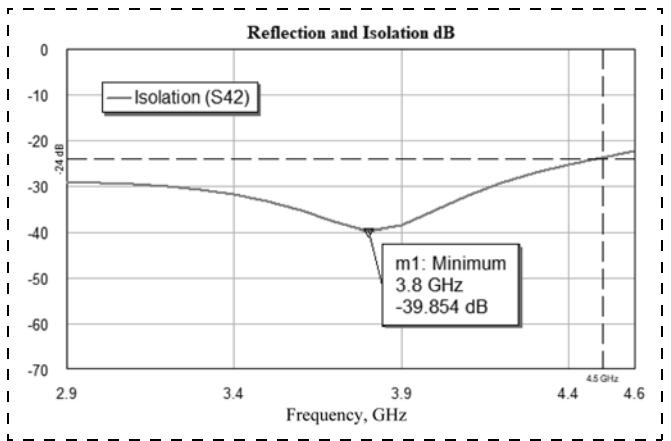


Рис. 8. АЧХ развязки прямого и связанного плеча (изоляции $|S(42)|$)

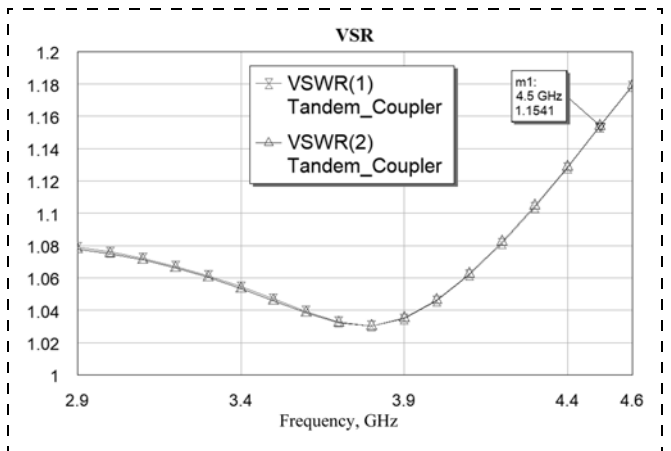


Рис. 9. КСВН входа и выхода НО

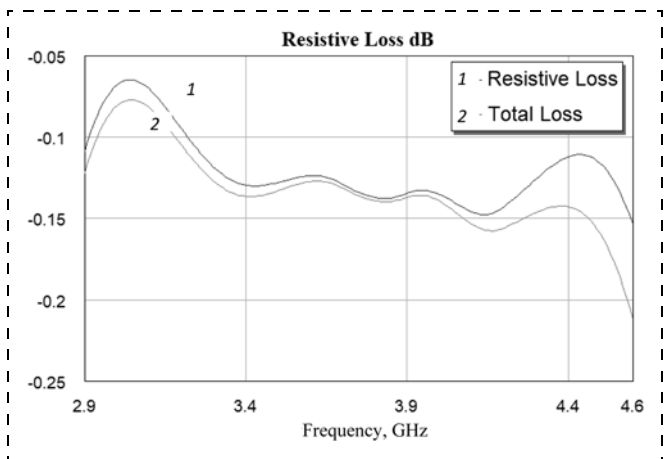


Рис. 10. Отношение вносимых потерь от частоты

С использованием метода конечных элементов для расчета характеристик были получены АЧХ прямого и связанного плеча, развязки, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) выводов направленного ответвителя и АЧХ вносимых потерь (рис. 7—10) и занесены в табл. 1.

Макет НО был выполнен на многослойной печатной плате. В качестве материала платы был выбран RO4003C (параметры приведены в табл. 2). Макет изготовлен методом попарного прессования слоев (рис. 11).

Для проведения измерения электрических параметров образцов разработанного НО была создана оснастка измерительная.

Оснастка измерительная должна обеспечивать возможность проверки характеристик макета ответвителя. Модель измерительной оснастки показана на рис. 12.

В результате проделанной работы был построен макет направленного ответвителя (рис. 13).

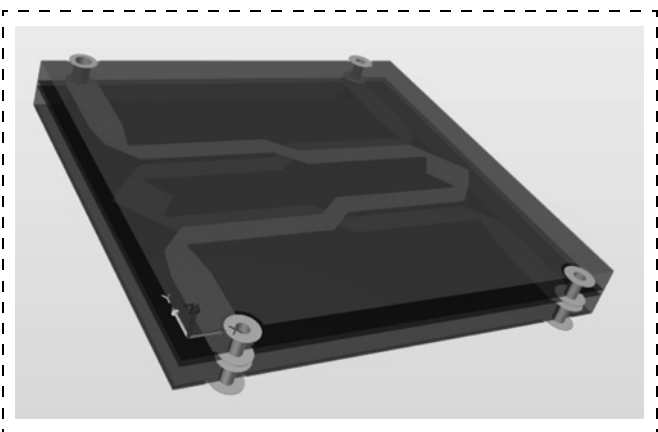


Рис. 11. 3D-модель топологии направленного ответвителя

Таблица 1

Результаты моделирования направленного ответвителя

Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра
Диапазон рабочих частот, ГГц	2,9...4,5
Коэффициент передачи прямого/связанного плечей, дБ	от -3,33
Развязка между выходными плечами, дБ	от 24
КСВН входа/выхода, отн. ед.	1,15
Вносимые потери, дБ	до 0,2

Таблица 2

Параметры материалов печатной платы НО

Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра
Диэлектрическая проницаемость, Ф/м	3,38
Тангенс диэлектрических потерь	0,0027
Толщина ядер, мм	0,762
Толщина препрега, мм	0,203
Толщина металлизации, мкм	18

Таблица 3

Сравнение результатов измерений с результатами моделирования

Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра	
	Модель	Измерение
Диапазон рабочих частот, ГГц	2,9...4,5	2,9...4,5
Коэффициент передачи прямого/связанного плечей, дБ	от -3,33	от -2,9
Развязка между выходными плечами, дБ	от 24	от 27,2
КСВН входа/выхода, отн. ед.	1,15	1,29
Вносимые потери, дБ	до 0,2	до 0,4

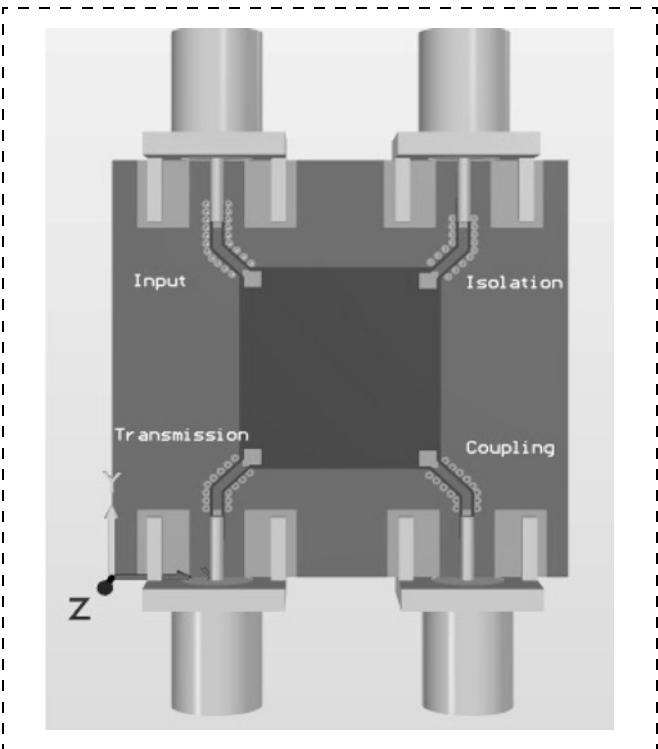


Рис. 12. 3D-модель измерительной оснастки

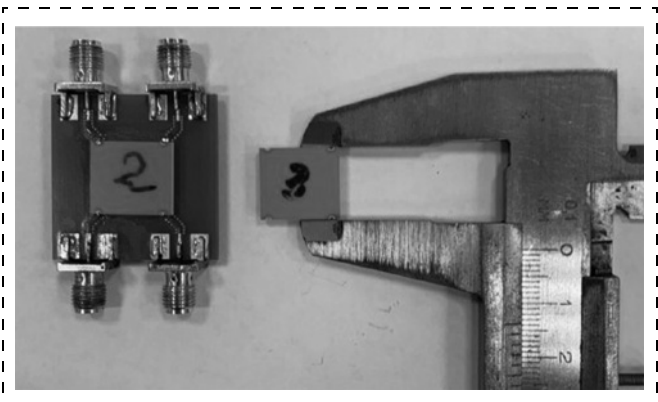


Рис. 13. Макет направленного ответвителя с измерительной оснасткой

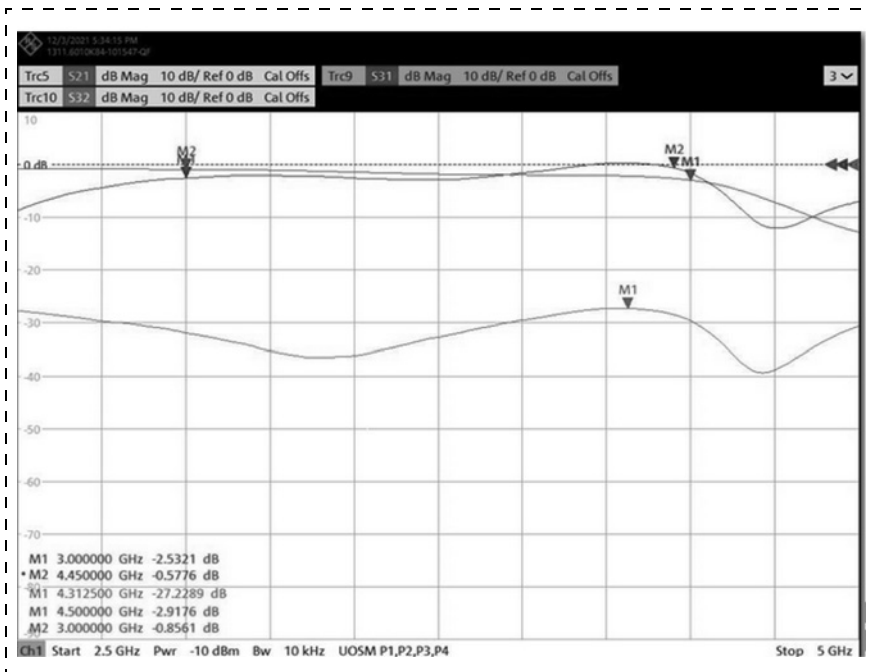


Рис. 14. АЧХ прямого $|S(21)|$, связанного $|S(31)|$ плеча НО и коэффициента развязки прямого и связанного плеча $|S(32)|$

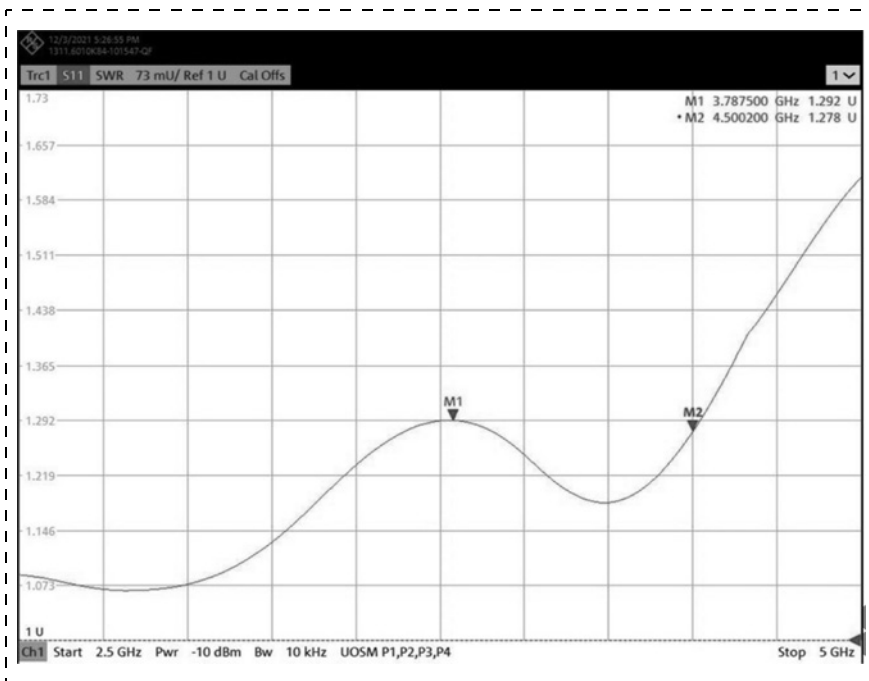


Рис. 15. КСВН входа

Были проведены измерения характеристик макета направленного ответвителя. Результаты показаны на рис. 14, 15 и занесены в табл. 3 для сравнения характеристик модели с макетом НО.

Заключение

В результате измерения макета были получены следующие характеристики: рабочий диапазон

частот 2,9...4,5 ГГц; коэффициент передачи прямого/связанного плечей — 2,9 дБ; развязка между выходными плечами от 27,2 дБ; КСВН входа/выхода 1,29 отн. ед.; вносимые потери до 0,4 дБ.

Данный подход можно использовать только для предварительной оценки характеристик макета направленного ответвителя. Для уменьшения размеров НО можно применить линии из композитных материалов, учитывая толщину проводников.

Наряду с методом конечных элементов существует множество других методик для проектирования микрополосковых устройств. Одной из таких методик является метод конформных отображений, который позволяет рассчитывать различные структуры, используя преобразования Кристоффеля—Шварца. Более простым является метод конечных разностей.

Данная работа выполнена в рамках соглашения с Минобрнауки России от 01.09.2021 № 075-15-2021-689, уникальный идентификационный номер 2296.61321X0010.

Список литературы

1. Ковалева И. С. Конструирование и расчет полосковых устройств. М.: Сов. радио, 1974. — 296 с.
2. Малорацкий Л. Г., Явич Л. Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. М.: Сов. радио, 1972. — 232 с.
3. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / Под ред. В. И. Вольмана. М.: Радио и связь, 1982. — 328 с.
4. Разевиг В. Д., Потапов Ю. В., Куршин А. А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. М.: Солон-Пресс, 2003. — 496 с.
5. Климачев И. И., Иовдальский В. А. СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования / Под ред. А. Н. Королева. М.: Техносфера, 2006. — 351 с.
6. Дансмор Д. П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей / Под ред. С. В. Хохлова. М.: Техносфера, 2019. — 736 с.
7. Николаенков Н. С., Сарапульцев Д. А. Макетирование направленного ответвителя мощности в диапазоне частот 3,0—4,5 ГГц на многослойных печатных платах // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2020. Вып. 4 (259). С. 63—69.

D. A. Sarapultsev, Engineer, e-mail: sarapulcev@mirea.ru, **A. A. Zolotorev**, Ph. D., zolotarev@mirea.ru, **M. L. Tsoregradskaya**, Laboratory Assistant, e-mail: caregradskaya@mirea.ru
MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author:

Sarapultsev Danila A., Engineer, MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454,
e-mail: sarapulcev@mirea.ru

Analysis and Modeling of a Directional Microwave Coupler as SMD Component

*Received on January 13, 2022
Accepted on February 24, 2022*

The article describes the calculation, modeling and layout of the directional coupler. In the course of the work the market analysis was carried out, the model of directional coupler in the frequency range of 2.9–4.5 GHz, the layout of the device and measuring equipment were developed. Directional couplers with different transient attenuation are widely used in the distribution circuits of antenna arrays, as well as to control the power of the radio signal propagating in the transmission line, in power meters, automatic gain control systems, radio receivers, etc. The choice of circuit solutions used for the construction of directional couplers is carried out depending on the specific technical requirements for electrical parameters, the range of operating frequencies and the capabilities of the technological base. Practically all variety of structures of directional couplers realized on elements is a result of modification of the simplest structures. The main types of directional taps include stub, single-stage and tandem-based. During the simulation, it turned out that the directional coupler based on a tandem connection of two connected transmissions with the location of the transmission lines on different layers of the multilayer printed section was suitable for this work. This is due to the fact that when modeling the directional coupler with transmission lines on one printed circuit board, The gap between these lines is too small ($\approx 10 \mu\text{m}$), which is extremely difficult to perform on a microstrip structure.

Keywords: directional coupler, related lines, focus, isolation, branch, frequency response, tandem connection

For citation:

Sarapultsev D. A., Zolotorev A. A., Tsoregradskaya M. L. Analysis and Modeling of a Directional Microwave Coupler as SMD Component, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 137–142.

DOI: 10.17587/nmst.24.137-142

References

1. **Kovaleva I. S.** Construction and calculation of strip devices. Moscow, Sov. Radio, 1974. 296 p. (in Russian).
2. **Maloratski L. G., Yavich L. R.** Design and calculation of microwave elements on striped lines. Moscow: SoV. Radio, 1972. 232 p. (in Russian).
3. **Handbook** for calculating and constructing microwave strip devices. Ed. V. I. Wolman. Moscow: Radio i Svyaz, 1982. 328 p. (in Russian).
4. **Razevis V. D., Potapov Yu. V., Kurushin A. A.** Designing microwave devices using Microwave Office. — Moscow: Solon-Press, 2003, 496 p. (in Russian).
5. **Klimachev I. I., Iovdalsky V. A.** Microwave GIS. Basics of technology and constructing. Ed. A. N. Korolev, Moscow, Technosphere, 2006. — 351 p. (in Russian).
6. **Dandsmor D. P.** Desktop book engineer. Measurements of microwave-device parameters using advanced vector analysis of circuits, Ed. S. V. Khokhlov, Moscow, Technosphere, 2019. — 736 p. (in Russian).
7. **Nikolayenkov N. S., Sarapultsev D. A.** Maketing of the directional power branch in the frequency range is 3.0–4.5 GHz on multilayer printed circuit boards, *Electronic technique. Series 2. Semiconductor devices*, 2020, is 4 (259), pp. 63–69 (in Russian).

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 537.874.7

DOI: 10.17587/nmst.24.143-153

О. А. Тестов, электроник 1 категории ИЦ ЦМИД, e-mail: otestov@mail.ru;
К. Г. Гареев, канд. техн. наук, доц. каф. МНЭ, e-mail: kggareev@yandex.ru;
В. В. Лучинин, д-р техн. наук, зав. каф. МНЭ, директор ИЦ ЦМИД, e-mail: cmid_leti@mail.ru;
А. Е. Комлев, канд. техн. наук, доц. каф. ФЭТ, e-mail: a.komlev@mail.ru;
Д. О. Тестов, аспирант каф. МНЭ, инженер ИЦ ЦМИД, e-mail: dtestov@bk.ru;
И. О. Тестов, аспирант каф. МНЭ, инженер ИЦ ЦМИД, e-mail: igortestov1999@mail.ru;
И. К. Хмельницкий, канд. хим. наук, вед. науч. сотр. ИЦ ЦМИД,
e-mail: khmelnitskiy@gmail.com
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)

КОНФОРМНАЯ ИНТЕГРИРУЕМАЯ МИКРО- И НАНОКОМПОЗИЦИОННАЯ ПАССИВНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЗАЩИТА ОБЪЕКТОВ БИОТЕХНОСФЕРЫ

Поступила в редакцию 26.08.2021

Предложены физико-технологические решения, обеспечивающие пассивную защиту миниатюрных носимых объектов био- и техносферы от воздействия электромагнитного излучения в частотном диапазоне от 50 МГц до 18 ГГц. Предложены и исследованы разнообразные конформные микро- и наноконпозиции электромагнитных экранов и поглотителей электромагнитных волн.

Ключевые слова: электромагнитный экран, поглотитель электромагнитных волн, конформность, пленка, металл, полимер, углерод, пластмасса, гидрогель, композит

Введение

Эволюция техники и технологий характеризуется гиперспектральным воздействием электромагнитных полей (ЭМП) на объекты био- и техносферы, что в первую очередь определяется широким распространением и постоянным энергочастотным уплотнением средств связи, радиочастотных меток (RFID) информационных локальных систем, развитием телевизионных и радиовещательных сетей. Их работа, наряду с профессионально-бытовой интеграцией в инфокоммуникационную среду нового поколения может оказывать определенные негативные физиологические воздействия на человека. При этом параметры ЭМП (плотность потока энергии, напряженности электрической и магнитной составляющих поля и частота) могут иметь значения, критические для нарушения и деградации рабочих функций и объектов, соответственно,

окружающей техносферы. Это связано с возможными преднамеренными энергоинформационными воздействиями, направленными на сбой в работе и "перехват" процессов управления объектами инфо- и энерготехносферы.

В настоящее время номенклатура эффективных миниатюрных интегрируемых средств защиты объектов биотехносферы от электромагнитных излучений (ЭМИ) крайне ограничена.

Цель данной статьи — анализ и представление возможных физико-технологических решений, обеспечивающих конформную интеграцию современных микро- и наноконпозиций для обеспечения пассивной электромагнитной защиты преимущественно миниатюрных носимых объектов с ориентацией на защиту от ЭМИ в наиболее часто используемом диапазоне частот — от 50 МГц до 18 ГГц.

Физико-материаловедческие основы защиты от ЭМИ

Пассивную электромагнитную защиту в виде электромагнитных экранов¹ или поглотителей электромагнитных волн² можно классифицировать по различным признакам: принципу работы; используемым материалам; частотному диапазону и другим признакам, используемым в зависимости от условий, сформулированных при постановке задачи электромагнитной защиты. Пример возможной классификации ЭМЭ и ПЭВ¹, характеризующей их структуру, состав и взаимодействие с ЭМИ представлен на рис. 1.

Количественная оценка выполнения ЭМЭ и ПЭВ своих рабочих функций проводится путем определения значений соответственно эффективности экранирования SE (отношению амплитуд выходящей и входящей электромагнитных волн ЭМВ) и потерь на поглощение L (отношение амплитуд отраженной и падающей ЭМВ). Амплитуда ЭМВ по мере ее проникновения вглубь проводящей среды уменьшается. Глубину проникновения δ , при которой ЭМВ ослабевает в e раз и разворачивается по фазе на $\pi/2$, называют толщиной поверхностного слоя (скин-слоя). Значение δ рассчитывают по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_v}{\pi f \mu_0 \mu}}, \quad (1)$$

где f — частота ЭМВ, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; μ — относительная магнитная проницаемость вещества; ρ_v — удельное объемное сопротивление.

Оценить ожидаемое значение SE можно в зависимости от соотношения толщины l ЭМЭ и δ по следующим формулам:

$$SE = \frac{30\pi}{\sqrt{2}\rho_v} e^{l/\delta}, \quad \text{при } l/\delta > 1; \quad (2)$$

$$SE = \frac{60\pi l}{\rho_v}, \quad \text{при } l/\delta < 0,1, \quad (3)$$

при этом рассматривается случай падения плоской ЭМВ на бесконечный плоский ЭМЭ [3]. SE и L по своему физическому смыслу эквивалентны коэф-

¹ Электромагнитный экран (ЭМЭ) — экран из проводящего материала, предназначенный для ослабления проникновения изменяющегося электромагнитного поля в определенную область [1].

² Поглотители электромагнитных волн (ПЭВ) — устройства, структуры, конструкции, выполненные из диэлектрических, ферритовых и других радиопоглощающих материалов, в целях получения малых значений коэффициента отражения падающей электромагнитной волны в заданном диапазоне частот [2].

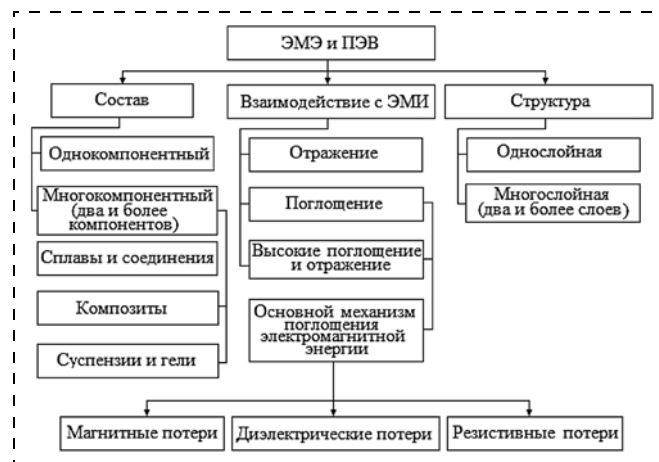


Рис. 1. Классификация ЭМЭ и ПЭВ по различным признакам

фициентам матрицы рассеяния, соответственно коэффициентам передачи S_{21} и отражения S_{11} , которые после проведения измерений выражаются в децибелах [4]:

$$S_{21} = -10\lg(SE), \quad (4)$$

$$S_{11} = -10\lg(L). \quad (5)$$

Для технических средств уровни отражения (для ЭМЭ) или поглощения (для ПЭВ) определяются в условиях их эксплуатации с учетом электромагнитной обстановки, в зависимости от напряженности воздействующих на них электромагнитных полей (ЭМП) с учетом вероятности возникновения паразитных помех природного и искусственного происхождения [5] или направленных воздействий различного назначения.

Фактически одним из критических параметров, определяющих перспективы использования материала в качестве основы для создания ЭМЭ или ПЭВ, можно считать электрическое сопротивление (или обратную величину — проводимость), по мере уменьшения которого возрастает энергия отраженной ЭМВ.

Далее представлен краткий обзор результатов работ, направленных на развитие исследовательской базы, обеспечивающей возможность изучения и сопоставления свойств разрабатываемых кластерных и слоевых микро- и наноконпозиций конформно интегрируемых в миниатюрные носимые объекты биотехносферы для пассивной электромагнитной защиты.

Конформные микро- и наноконпозиции для защиты от ЭМИ

Поглотители электромагнитных волн на основе гидрогенизированного углерода с инкорпорированными нанокластерами магнитных металлов. Основное назначение ПЭВ связано с уменьшением значений S_{11} и может быть основано на использовании гидрогенизированного углерода с вкраплениями

нанокластеров магнитных металлов, которые при толщине до 0,5 мкм обеспечивают потери энергии ЭМИ до 12 дБ в частотном диапазоне 2...14 ГГц [6]. Удельное электрическое сопротивление таких пленок изменяется в широких пределах в зависимости от концентраций углерода с sp^3 -типом гибридизации [7] и металлических кластеров [8].

Покрытия на основе аморфного гидрогенизированного углерода с наночастицами никеля $a-C:H(Ni)$ и кобальта $a-C:H(Co)$ (рис. 2) были получены с помощью специально разработанной магнетронной распылительной системы [9].

В ходе экспериментов были изучены зависимости коэффициентов распыления Co и C от энергии ионов аргона, на основании которых был разработан технологический процесс, позволяющий получать образцы покрытий, обладающих магнитными свойствами и содержащих упорядоченную систему нанокластеров металла в углеродной матрице (рис. 3). По результатам проведенных исследований были получены патенты РФ № 2362838 и РФ № 68190 на изобретение и полезную модель соответственно [10, 11].

Покрытия на основе $a-C:H(Me)$ находят применение при формировании многослойных структур ПЭВ. Такие ПЭВ получают путем соединения (например, склеивания) нескольких слоев кевлара с покрытием $a-C:H(Me)$. Гибкая тканевая основа позволяет придавать ПЭВ достаточно сложную форму. Обеспечение высоких потерь энергии ЭМИ достигается за счет использования четырех и более слоев с покрытием $a-C:H(Me)$ средней толщиной 0,5...2,0 мкм, при этом концентрация ферромагнитных кластеров в каждом последующем слое отличается от их концентрации в предыдущем слое [12].

Электромагнитные экраны и поглотители электромагнитных волн на основе пластмасс с магнитными и проводящими наполнителями. Использование пластмасс с магнитными и проводящими наполнителями для производства ПЭВ обусловлено возможностью использования стандартного промышленного оборудования. Технологии переработки пластмасс — экструзия, каландрование, литье обеспечивают низкие затраты при получении образцов, что открывает широкие возможности. Получаемые материалы состоят из диэлектрической связующей матрицы, выполненной из каучука, полиэтилена, полистирола, пластифицированного поливинилхлорида (ПВХ), полиамида, полиоле-

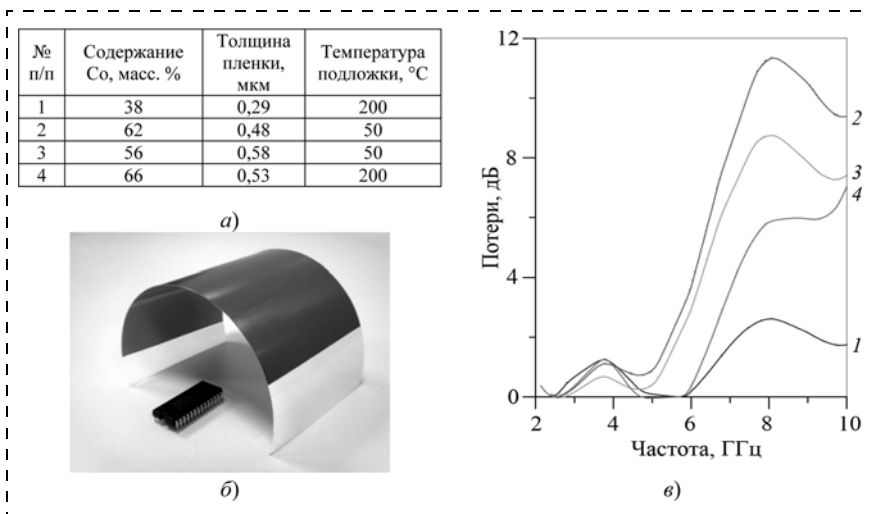


Рис. 2. Образцы композитных покрытий $a-C:H(Co)$:

a — перечень образцов; *b* — вид покрытия, нанесенного на корпус интегральной микросхемы и полимерную ленту; *в* — частотная зависимость потерь энергии ЭМИ, полученная при проведении измерений с помощью микрополосковой линии передачи

фина, эпоксидной фенольной, полиэфирной смолы или другого аналогичного материала, в котором равномерно распределены частицы или волокна магнитных и/или проводящих материалов (например, металлов, сплавов, ферритов, углеродных материалов различного типа).

Образцы для проведения исследований были получены методом каландрования (при температуре вальцов +60 °C). Равномерность распределения вкраплений феррита по объему достигалась путем многократного прокатывания получаемого материала. Полимерная матрица была изготовлена из полиизопренового каучука и поливинилхлорида с добавками хлорированного полиэтилена. Полиизопреновый каучук по сравнению с ПВХ позволял получать более эластичные материалы при меньшей стойкости к повышенной температуре. В качестве наполнителей использовали марганец-

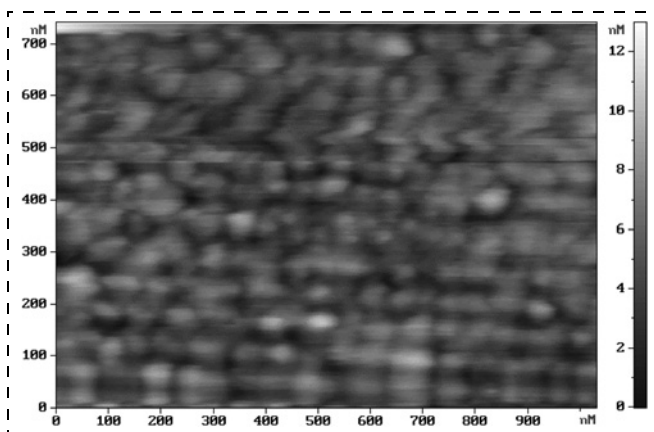


Рис. 3. Атомно-силовая микроскопия поверхности нанокластерных покрытий

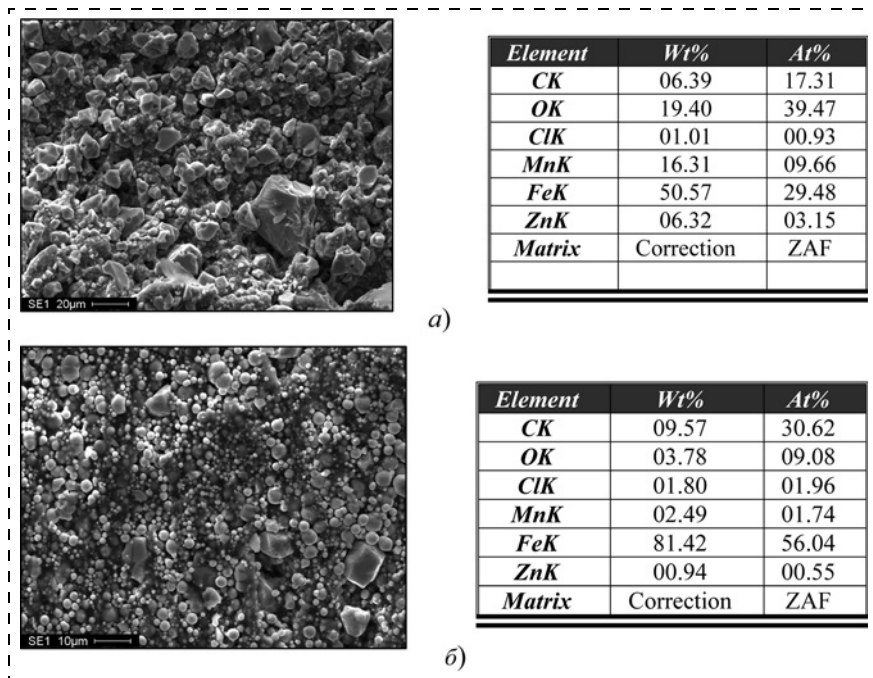


Рис. 4. Результаты исследований с помощью электронного микроскопа Quanta Inspect, оснащенного модулем энергодисперсионного анализа EDAX, поверхности и состава полимерных образцов с различными наполнителями:

а — с ферритом типа 2500НМС, толщина 1,6 мм; б — с карбонильным железом типа Р10 и ферритом типа 2500НМС, массовые доли соответственно 74,7 и 13,6 %, толщина 1,3 мм

цинковые ферриты (500НМС, 2500НМС производства ОАО "Завод Магнетон", Санкт-Петербург, Россия), карбонильное железо (Р20, Р100 по ГОСТ 13610—79), аморфные сплавы с высоким содержанием кобальта (АМАГ 172, АМАГ 200 производства ПАО "Мстатор", г. Боровичи, Россия). На рис. 4 представлены структурно-морфологические характеристики и состав полученных образцов размерами 200 × 200 мм.

На основании полученных данных были сделаны выводы о размерах частиц наполнителя (<50 мкм), равномерности их распределения по объему образца, отсутствию или наличию агломератов частиц.

Исследования полученных образцов показали возможность их использования для создания ПЭВ, эффективность применения которых существенно повышается при формировании многослойных структур. На рис. 5 показаны частотные зависимости потерь энергии ЭМИ, полученные для образца на основе ПВХ и частиц АМАГ172 (массовая доля 78 %) толщиной 2 мм и четырехслойного материала средней толщиной 2,2 мм, состоящего из четырех склеенных слоев (каждый толщиной 0,5 мм) полиизопренового каучука с распределенными частицами АМАГ172 и технического углерода.

Высокие значения потерь энергии ЭМИ показывают перспективность применения ПЭВ такого типа, которые можно изготовить в виде одного или нескольких листов толщиной от 0,5 до 5 мм (и бо-

лее), сохраняющих свою форму или имеющих возможность ее изменения в некоторых пределах, которые устанавливают на защищаемый объект или окружающую его стенку корпуса. Кроме того такие ПЭВ можно заливать в формы с предварительно установленными в них объектами, которые после затвердевания материала будут полностью окружены радиозащитным материалом.

Композиции на основе гелей и жидкостей для защиты от воздействия ЭМИ. Оперативно конформно защитить объект от воздействия ЭМИ можно путем заполнения окружающего его объема материалом на основе жидкости или геля. Такое техническое решение перспективно для объектов сложной конфигурации или изменяющих свою форму.

Защитные свойства жидких и гелеобразных материалов изучали путем исследования образцов на водной основе. Вода является сильнополярным диэлектриком,

значения ее электропроводности варьируются в интервале от 10^3 до 10^5 Ом · м. Прохождение ЭМИ через воду сопровождается потерями при протекании электрического тока, поляризационными и релаксационными потерями [13], которые возрастают при увеличении частоты [14].

Образцы на основе геля изготавливали путем механического смешивания полиметилсилоксана

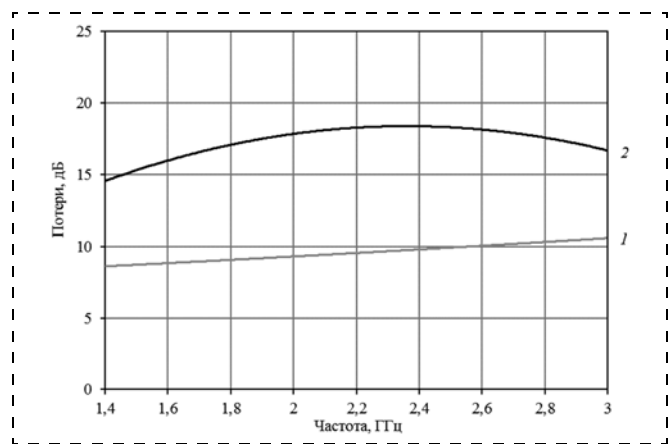


Рис. 5. Частотные зависимости потерь ЭМИ в диапазоне 0,8...3,0 ГГц для образцов:

1 — на основе ПВХ и частиц АМАГ172 (массовая доля 78 %) толщиной 2 мм; 2 — на основе четырех склеенных слоев (каждый толщиной 0,5 мм) полиизопренового каучука с распределенными частицами АМАГ172 и технического углерода

полигидрата (ПП) и наполнителей, которые при прохождении через них ЭМИ, обеспечивают снижение мощности ЭМИ. Технический углерод (по ГОСТ 7885—86) приводит в основном к возникновению резистивных потерь; феррит ЗСЧ (ОАО "Завод Магнетон) — магнитных потерь; карбонильное железо и АМАГ172 — резистивных магнитных потерь. Характеристики наполнителей приведены в табл. 1.

ПП, как любой другой гидрогель, теряет свои свойства по мере испарения воды. Экспериментально было установлено, что предельная массовая доля воды не должна быть меньше, чем ~82 % от ее исходного значения. В целях увеличения времени жизни образцов, изготовленных на основе гелей и жидкостей, осуществляли их герметизацию в полимерную оболочку.

Функциональные свойства образцов — частотные зависимости коэффициента передачи исследовали в двух диапазонах: 2...5 ГГц и 0,05...2,00 ГГц, что связано с использованием различных методов измерений соответственно с помощью рупорных антенн и на основе копланарной линии передачи (рис. 6).

Исследования частотных зависимостей S_{21} проводили при варьировании типа и концентрации наполнителей (массовая доля), изменении толщины материала, содержащего частицы феррита типа ЗСЧ, (массовая доля — 33 %), времени, прошедшего с момента изготовления образца, различных типов технического углерода, характерные результаты приведены на рис. 7.

Проведенные исследования показали, что введение в гель наполнителей с высокими магнитными или проводящими свойствами таких типов, как АМАГ172, Т900, Р-10, позволяет существенно снизить значения S_{21} . Для лучших образцов (на основе АМАГ 172) значения S_{21} в частотном диапазоне 2...5 ГГц уменьшается от 13,5 до 26,0 дБ.

Таблица 1

Характеристики наполнителей

Наименование	ТИП	Средний размер частиц, мкм	Уд. сопротивление материала, Ом · см	Магнитная проницаемость
Технический углерод	П234	0,02	5...5000	1
	П324	0,03		1
	П514	0,05		1
	Т900	0,09		1
Никелевый феррит-шпинель	ЗСЧ	< 300,00	~10 ⁶	10 ² ...10 ³
Аморфный сплав	АМАГ172	10...100	~10 ⁻⁶	70 000
Карбонильное железо	Р10	3,50	~10 ⁻⁷	13...15

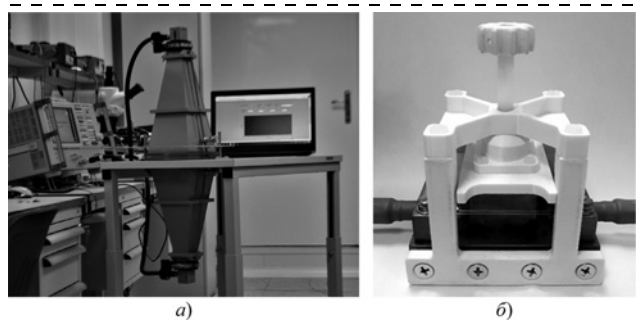


Рис. 6. Измерительные стенды:

a — на основе рупорных антенн; *б* — на основе копланарной линии передачи

Влияние ЭМИ на жидкие среды исследовали на примере магнитной жидкости на водной основе, содержащей частицы Fe₃O₄—SiO₂ сферической формы размерами менее 100 нм, созданной по разработанной технологии (патент РФ № 2639709) [15]. Исследования показали, что при толщине слоя магнитной жидкости, равной 6 мм, коэффициент поглощения электромагнитного излучения частотой свыше 7 ГГц составляет не менее 90 %, что может быть востребовано при защите технических систем (ТС) от воздействия ЭМИ, а также в области медицины при проведении локальной гипертермии [16].

На основании результатов проведенных исследований был получен патент на изобретение РФ № 2688894 [17].

Микро- и нанослоевые конформные металлические электромагнитные экраны. Рассмотренные выше технологические решения востребованы в достаточно локальных и специальных областях. Подавляющее большинство задач защиты от распространяющегося по эфиру ЭМИ решается путем использования ЭМЭ на основе материалов высокой проводимости, большая эффективность применения которых может быть объяснена на основании формулы (1): чем меньше удельная электрическая проводимость материала, тем меньшей толщины слой требуется для затухания энергии ЭМИ, проходящего через него. К ним относятся металлы и сплавы, характеризующиеся значением удельного объемного электрического сопротивления $\rho_v < 0,1 \cdot 10^{-6}$ Ом · м. Для некоторых металлов значения ρ_v приведены в табл. 2 [18, 19].

Практически всегда к перечню основных конкурентных преимуществ любой технической продукции относится превосходство по массогабаритным параметрам. С точки зрения применения металлических ЭМЭ снижение массогабаритных показателей связано с необходимостью решения двух основных задач:

1) определение минимальной толщины слоя металлизации, при которой выполняются заданные требования, предъявляемые к значению SE ;

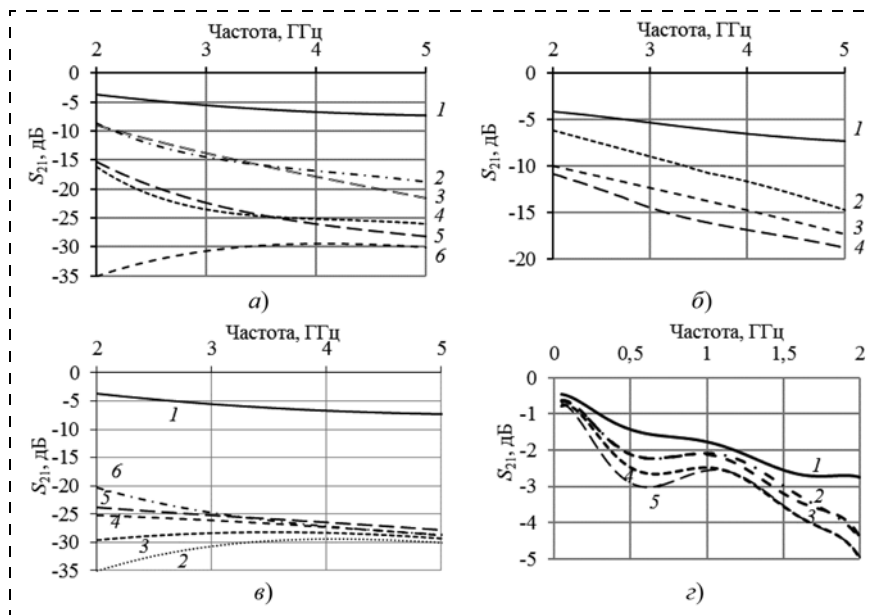


Рис. 7. Частотные зависимости S_{21} в диапазонах частот 2...5 ГГц и 0,05...2,00 Гц, полученные при изменении:

a — типа и массовой доли наполнителей (1 — ячейка без образца; 2 — 33 % ЗСЧ; 3 — гель без наполнителей; 4 — 33 % АМАГ172; 5 — 10 % Т900; 6 — 60 % Р-10); *б* — толщины слоя исследуемого материала (1 — ячейка без образца; 2 — 33 % ЗСЧ, толщина 2 мм; 3 — 33 % ЗСЧ, толщина 4 мм; 4 — 33 % ЗСЧ, суммарная толщина 6 (4 + 2) мм); *в* — возраста образцов (1 — ячейка без образца; 2 — 60 % Р-10 после изготовления; 3 — 60 % Р-10 через 1 сут; 4 — через 3 сут; 5 — через 7 сут; 6 — через 260 сут.); *г* — типа углеродного наполнителя при его массовой доле 10 % (1 — ячейка без образца; 2 — П514; 3 — П324; 4 — Т900; 5 — П234)

2) обеспечение конформности с поверхностью экранируемого объекта.

Следует отметить, что для ЭМЭ значение толщины l может быть меньше значения глубины проникновения δ в том случае, если уменьшение энергии ЭМИ достаточно для обеспечения работоспособности защищаемой системы. Таким образом становится актуальной задача исследования частотной зависимости S_{21} . Из приведенных в табл. 2 материалов наиболее технологичны и дешевы медь, алюминий, цинк и никель. На их поверхности образуется оксидная пленка, удовлетворяющая условию сплошности Пиллинга и Бедворса [20], обеспечивающая защиту металла от коррозии. Однако для никеля толщина и скорость роста оксидной пленки имеют наименьшие значения. Кроме того работа любой электронной системы сопровождается тепловыделением, поэтому коэффициенты теплового расширения α_t металла и его оксидной пленки должны, по возможности, иметь наименьшее различие. Для никеля и его оксида в нормальных климатических условиях α_t имеет значения соответственно 12,6 и $12,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что обеспечивает лучший результат по сравнению с другими рассматриваемыми металлами [21]. Следует также отметить, что никель относится к магнитным материалам, следовательно, проходящее через его

пленку ЭМИ будет терять свою энергию в том числе за счет магнитных потерь, поэтому для проведения исследований был выбран никель.

Тонкие пленки формировали методом магнетронного распыления никеля марки НПОЭВИ [22] на подложках из стекла и кремния. Для каждого из полученных образцов с помощью зондового микроскопа типа "Veeco Dimension 3100" (Veeco Instruments Inc., США) определяли толщину, на основании данных измерений четырехзондовым методом — удельное электрическое сопротивление [23, 24], и после исследований — зависимости S_{21} в диапазоне частот 2...18 ГГц (рис. 8).

Учитывая трудоемкость определения значений SE для всех возможных толщин тонких пленок, было проведено исследование, направленное на сравнение экспериментальных значений S_{21} с расчетными, полученными по формуле (4). После расчета значений δ (с учетом изменения значений магнитной проницаемости

никеля от частоты [25]) было установлено, что для определения SE можно использовать формулу (3), так как во всем рассматриваемом диапазоне частот $l/\delta < 0,1$ (рис. 9).

Альтернативный способ расчета значений SE для слоев толщиной $l < 0,18$ изложен в работе [26]. В соответствии с ним эффективность экранирования может быть оценена по формуле:

$$SE \approx R = \frac{Z_0}{4Z_m}, \quad (6)$$

где $Z_0 = 120\pi \text{ Ом} \approx 377 \text{ Ом}$, а $Z_m = \sqrt{2\pi f \mu \mu_0 \rho_v}$.

Таблица 2
Электрическое сопротивление химически чистых металлов [18, 19]

Наименование	ρ_v , мкОм · м	Наименование	ρ_v , мкОм · м
Серебро	0,015	Вольфрам	0,055
Медь	0,017	Молибден	0,057
Золото	0,023	Цинк	0,059
Алюминий	0,026	Кобальт	0,064
Родий	0,043	Никель	0,073
Магний	0,045	Кадмий	0,076
Иридий	0,054	Железо	0,097

На рис. 10 приведены результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений S_{21} .

Результаты в диапазоне частот 2...12 ГГц, полученные по формуле (3), по своим значениям ближе к экспериментальным данным по сравнению с соответствующими результатами, полученными по формуле (6). Для пленок толщиной более 100 нм эта тенденция сохраняется до частот около 16 ГГц.

Характер изменения S_{21} при изменении частоты ЭМИ лучше отражают результаты, полученные по формуле (6), которые по мере увеличения толщины пленки постепенно приближаются к расчетным значениям. Можно выделить три интервала толщин: от 4 до 35 нм, от 35 до 100 нм и от 100 до 250 нм, в которых значение S_{21} имеет практически линейную зависимость от l (что соответствует как экспериментально полученным результатам, так и результатам, рассчитанным по формуле (6)). Для этих интервалов можно вычислить зависящие от типа используемых в составе портативного закрытого измерительного стенда приемной и передающей антенн и габаритных размеров образцов исследуемых материалов поправочные коэффициенты для расчета значений SE во всех диапазонах рассматриваемых частот и толщин.

Изучение свойств тонких пленок никеля толщиной до 250 нм показывает возможность их использования для создания ЭМЭ, которые в диапазоне частот от 2 до 18 ГГц обеспечивают уровень SE до 25 дБ. Такие значения SE в подавляющем большинстве случаев достаточны при решении задач электромагнитного экранирования и электромагнитной совместимости.

Следует учитывать две особенности применения ЭМЭ на основе тонких пленок материалов высокой проводимости:

- реальные электронные системы могут иметь токопроводящие поверхности, обработанные изолирующим покрытием, которое будет служить подложкой для нанесения металлической пленки;

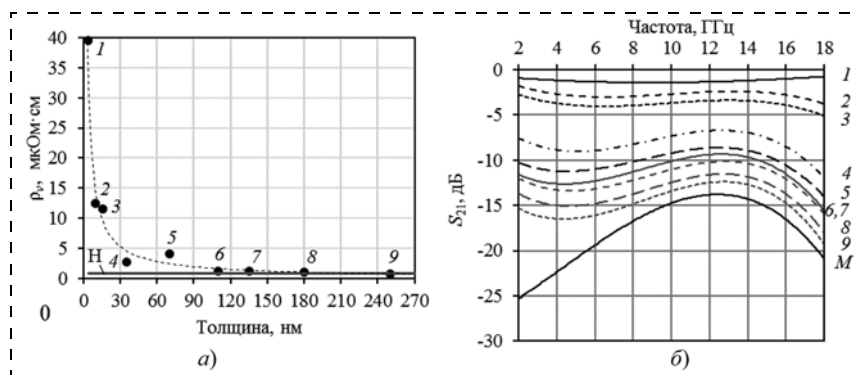


Рис. 8. Изменение характеристик тонких пленок Ni:

a — удельного объемного сопротивления от толщины, H — значение характерное для химически чистого никеля; b — коэффициента передачи от частоты для различных толщин; M — зависимость, характерная для металлического ЭМЭ, при $l \gg \delta$ (l — 4 нм; 2 — 10 нм; 3 — 16 нм; 4 — 35 нм; 5 — 70 нм; 6 — 110 нм; 7 — 135 нм; 8 — 180 нм; 9 — 250 нм)

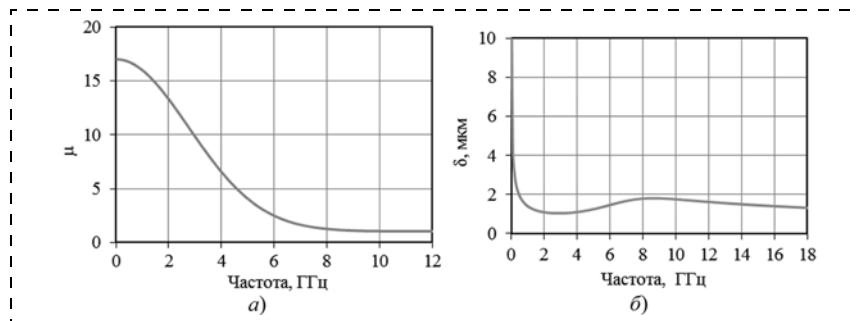


Рис. 9. Результаты расчетов характеристик Ni:

a — частотная зависимость относительной магнитной проницаемости в диапазоне 0...12 ГГц; b — зависимость толщины глубины проникновения от частоты

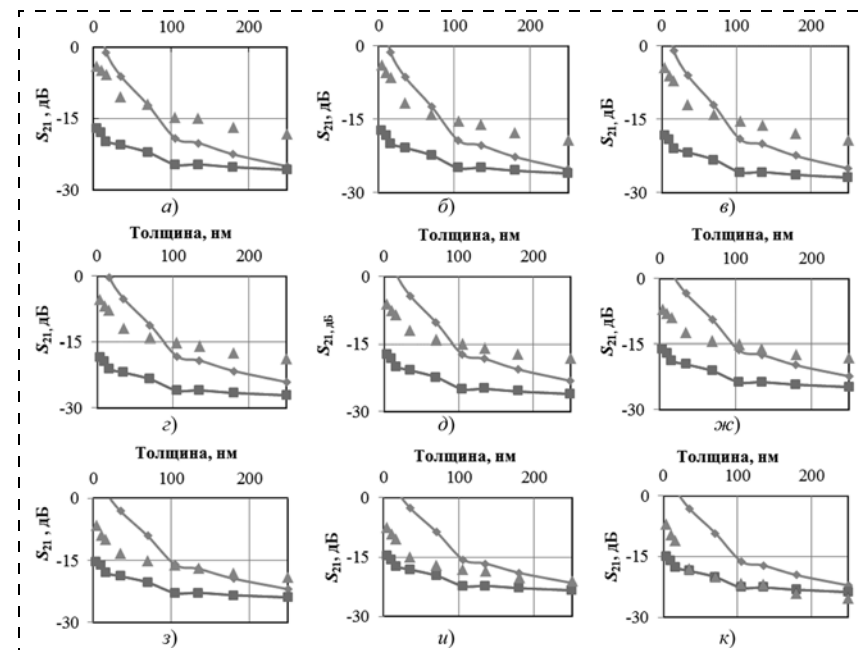


Рис. 10. Зависимости S_{21} от толщины для тонких пленок никеля при различных частотах, полученные экспериментально и в результате расчета:

a — 2 ГГц; b — 4 ГГц; $в$ — 6 ГГц; $г$ — 8 ГГц; $д$ — 10 ГГц; $ж$ — 12 ГГц; $з$ — 14 ГГц; $и$ — 16 ГГц; $к$ — 18 ГГц; \blacktriangle — значения, полученные экспериментально; \blacklozenge — значения, рассчитанные по формулам (3), (4); \blacksquare — значения, рассчитанные по формулам (3), (6)

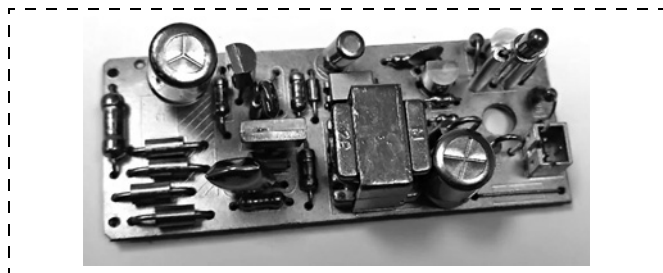


Рис. 11. Вид изделия электронной техники с нанесенной на него многослойной структурой на основе тонких пленок с экранирующим слоем, выполненным из никеля, толщиной 100...150 нм

— процесс окисления металла имеет долговременную тенденцию, поэтому в целях обеспечения надежности работы ЭМЭ после проведения металлизации на поверхность пленки необходимо нанести защитное покрытие.

В связи с этим состав ЭМЭ должен включать в себя минимум три слоя: изолирующий, экраниру-

ющий и защитный. Требования, предъявляемые к изолирующему слою: конформность, малая толщина, сплошность, высокие диэлектрические свойства и др., практически идентичны требованиям, предъявляемым к защитному слою, поэтому целесообразно для их изготовления использовать один и тот же материал. В проведенных работах в качестве такого материала применяли поли-пара-ксилилен толщиной от 15 до 50 мкм, синтезируемый по технологии вакуумно-пиролитического осаждения [27].

Конформный ЭМЭ был сформирован по разработанной технологии на плате преобразователя сетевого напряжения 220 В в напряжение питания мобильного телефона 12 В, 1,5 А (рис. 11).

Проводящие полимеры и композиты их на основе.

Тотальная защита человека от воздействия ЭМИ остается перспективной задачей, требующей решения, и применение средств коллективной безопасности не отменяет требований, предъявляемых к индивидуальной защите. Таким требованиям со-

ответствует защитная одежда на основе проводящих полимеров. Проводящие полимеры (ПП) используют в производстве органических электронных компонентов: транзисторов; светоизлучающих диодов; солнечных элементов [28]. Состав и структура ПП может изменяться в зависимости от требований, предъявляемых к их электродинамическим и механическим свойствам, варьирование которых можно проводить с помощью методов молекулярного дизайна [29].

В качестве объектов исследований были выбраны полианилин (ПАНИ) и композиция поли(3,4-этилендиокситиофена) и полистиролсульфоната (ПЭДОТ:ПСС). Образцы проводящих полимеров наносили методом полива на полиэтиленовые подложки размерами 42 × 42 мм с последующей сушкой в сушильном шкафу при температуре 40 °С, толщину пленок варьировали в диапазоне 50...200 мкм. На рис. 12 приведены результаты исследований частотной зависимости коэффициента поглощения электромагнитного излучения P , рассчитанного по формуле

$$P = (1 - |S_{21}|^2 - |S_{11}|^2) \cdot 100$$

для образцов пленок ПАНИ различной толщины, и частотные зависимости S_{21} для образцов пленок ПЭДОТ:ПСС [30].

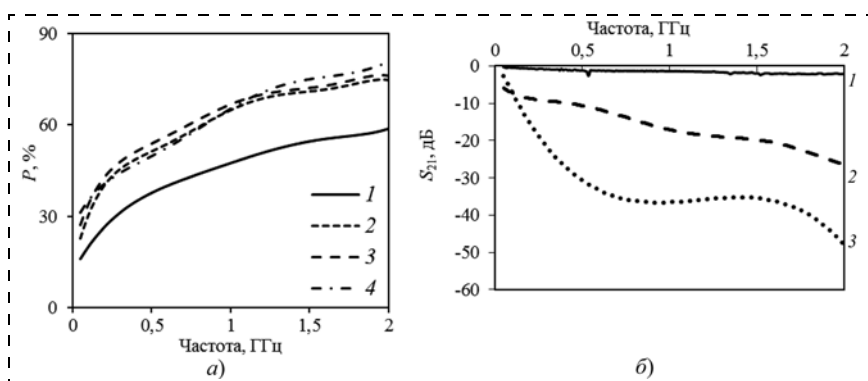


Рис.12. Частотные зависимости:

a — коэффициента поглощения пленок: 1 — ПАНИ 0,11 мм, 2 — ПАНИ 0,12 мм, 3 — ПАНИ 0,14 мм, 4 — ПАНИ 0,16 мм; *б* — коэффициента передачи пленок (ПЭДОТ:ПСС) толщиной 52 и 115 мкм [30]: 1 — ячейка без образца; 2 — ПЭДОТ:ПСС (~1 %); 3 — ПЭДОТ:ПСС (~3 %)

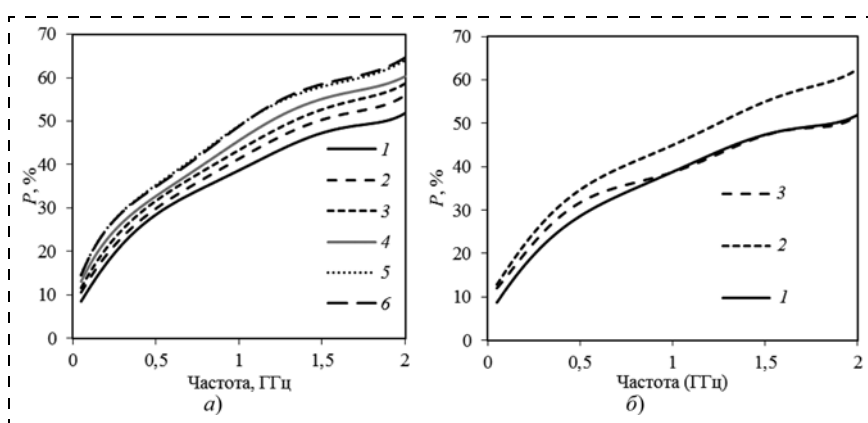


Рис. 13. Частотные зависимости потерь энергии ЭМИ в образцах композитных материалов:

a — на основе желатина и ПАНИ, 1 — 0 % ПАНИ, 2 — 22 % ПАНИ, 3 — 36 % ПАНИ, 4 — 46 % ПАНИ, 5 — 53 %, 6 — 59 %; *б* — на основе желатина и ПЭДОТ:ПСС, 1 — 0 % ПЭДОТ:ПСС, 2 — 5 % ПЭДОТ:ПСС, 3 — 10 % ПЭДОТ:ПСС [31]

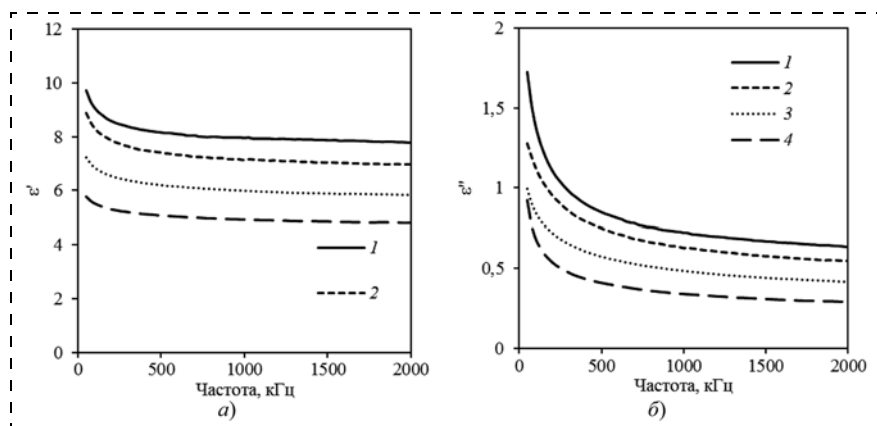


Рис. 14. Частотные зависимости компонент комплексной диэлектрической проницаемости образцов на основе желатина и ПАНИ:

a — действительная часть; *b* — мнимая часть; 1 — 0 % ПАНИ, 2 — 22 % ПАНИ, 3 — 36 % ПАНИ, 4 — 59 % [31]

Увеличение толщины пленки ПАНИ свыше 0,12 мм не приводит к существенному изменению коэффициента поглощения, что, по-видимому, обусловлено формированием тонкого сплошного проводящего слоя, в котором замыкаются силовые линии электрического поля электромагнитной волны [30].

Исследованные проводящие полимеры могут служить пропиткой для тканей, используемых при производстве защитной одежды. В то же время проводящие полимеры, входящие в состав композитов на основе желатина, могут быть использованы для создания волокон, вплетаемых в защитный текстиль. Результаты исследования таких композиций приведены на рис. 13 [31].

Следует отметить, что полученные композитные материалы имеют характерные для диэлектриков значения диэлектрической проницаемости, которые были измерены двухэлектродным методом с помощью измерительной ячейки, разработанной в соответствии с ГОСТ 22372—77 [32]. На рис. 14 представлены результаты измерений частотной зависимости действительной и мнимой компонент комплексной диэлектрической проницаемости композита на основе желатина и ПАНИ [31].

В результате выполненных работ показана возможность применения проводящих полимеров для создания индивидуальных средств защиты человека от воздействия ЭМИ.

Заключение

Проведенные исследования были сосредоточены на создании и изучении свойств различных материалов и конформно интегрируемых в объекты микро- и наноразмерных композиций, ослабляющих энергию ЭМП в частотном диапазоне 50 МГц...18 ГГц, с преимущественной ориентацией на наиболее широко используемый инфокоммуникационный частотный диапазон.

Характер этих исследований соответствует основным тенденциям развития технологий формирования ЭМЭ и ПЭВ. В области создания ЭМЭ можно выделить стремление перейти от конструкционных материалов к пленкам и эластичным покрытиям с обеспечением конформности защитного слоя. ПЭВ, за редким исключением, применяют путем модификации поверхности готового объекта, что обуславливает одну из основных тенденций их исследований — сочетание свойств конструкционных материалов со способностью не отражать ЭМИ. К системным актуальным направле-

ниям, определяющим развитие ЭМЭ и ПЭМ, можно отнести:

- обеспечение селективности их рабочих частот;
- создание окон прозрачности;
- управляемость уровнем взаимодействия с ЭМИ в процессе эксплуатации.

Определенным потенциалом в этих областях обладают метаматериалы, направления совершенствования которых не противоречат основным тенденциям развития ЭМЭ и ПЭВ.

В заключение следует отметить, что значительный вклад в развитие работ СПбГЭТУ в области электромагнитной защиты внесли сотрудники ряда отечественных организаций: д-р физ.-мат. наук Л. В. Луцев (ФТИ им. А. Ф. Иоффе), канд. техн. наук А. Г. Голубков (ОАО "Завод Магнетон"), канд. физ.-мат. наук С. В. Козырев (СПбПУ) и канд. техн. наук В. А. Ширшова (ООО "Базальт").

Работа поддержана Российским научным фондом в рамках проекта № 21-19-00719.

Список литературы

1. ГОСТ 30372—2017. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 50011—92. Поглотители электромагнитных волн для экранированных камер. Общие технические условия.
3. Шапиро Д. Н. Электромагнитное экранирование. М.: Издательский Дом "Интеллект", 2010. 120 с.
4. Kovar S., Valouch J., Urbancokova H. Calculation of Shielding Effectiveness of Materials for Security Devices // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 125. P. 02036-1—02036-4.
5. ГОСТ Р 51317.2.5—2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств.
6. Петров В. В., Николайчук Г. А., Луцев Л. В., Яковлев С. В. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных наноструктур: получение, свойства и применение // Компоненты и технологии. 2008. № 10. С. 147—150.

7. **Тарала В. А., Синельников Б. М., Титаренко А. А.** и др. Влияние давления и потенциала подложки на свойства пленок алмазоподобного углерода // Вестник Южного научно-центра РАН. 2010. Т. 6, № 3. С. 18—26.
8. **Николайчук Г. А., Мороз О. Ю., Дунаевский С. М.** Электрические свойства пленочных нанокластерных на основе аморфного гидрогенизированного углерода // Журнал технической физики. 2018. Т. 88, вып. 11. С. 1672—1677.
9. **Барченко В. Т., Быков Ю. О., Ефременко А. М.** и др. Технологический модуль для получения нанокластерных покрытий // Вакуумная техника и технологии. 2008. Т. 18, № 2. С. 129—134.
10. **Барченко В. Т., Быков Ю. О., Гребнев О. Г.** и др. Устройство для нанесения нанокластерного покрытия. Патент РФ № 2362838 от 09.10.2007.
11. **Лучинин В. В., Алексеев А. Г., Быков Ю. О.** и др. Радиопоглощающее покрытие. Патент РФ № 68190 от 26.06.2007.
12. **Алексеев А. Г., Старостин А. П., Яковлев С. В.** и др. Радиопоглощающее покрытие и способ его получения. Патент РФ № 2228565 от 19.12.2002.
13. **Семихина Л. П.** Диэлектрические и магнитные свойства воды в водных растворах и биообъектах в слабых электромагнитных полях. Тюмень: ТюмГУ, 2005. 173 с.
14. **Диденко А. Н., Дмитриев М. С., Лалаян М. В.** Аномальное поглощение электромагнитных волн десятисантиметрового диапазона в воде. // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57, № 7. С. 734—741.
15. **Гареев К. Г., Рейнюк А. В., Тестов Д. О.** и др. Способ получения магнитной жидкости. Патент РФ № 2639709 от 29.03.2017.
16. **Гареев К. Г., Лучинин В. В., Севостьянов Е. Н.** и др. Частотная зависимость коэффициента поглощения электромагнитного излучения в магнитной жидкости // Журнал технической физики. 2019. Т. 89, вып. 6. С. 893—896.
17. **Гареев К. Г., Лучинин В. В., Тестов И. О., Тестов О. А., Хмельницкий И. К.** и др. Электромагнитный экран. Патент РФ № 2688894 от 20.06.2018.
18. **Справочник** по электротехническим материалам / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева — Т. 3. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отд-ние, 1988. 728 с.
19. **Jordan L., Swanger W. H.** The properties of pure nickel // Bureau of Standards Journal of Research. 1930. Vol. 5, N. 6. P. 1291.
20. **Дизенко Е. И., Новоселов В. Ф., Тугунов П. И., Юфин В. А.** Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров. М.: Недра, 1978. 199 с.
21. **Жук Н. П.** Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 1976. 472 с.
22. **ГОСТ 19241—2016.** Никель и низколегированные никелевые сплавы, обрабатываемые давлением. Марки.
23. **Smits F. M.** Measurement of sheet resistivities with the four-point probe // Bell System Technical Journal. 1958. Vol. 37, is. 3. P. 711—718.
24. **Topsoe H.** Geometric Factors in Four Point Resistivity Measurement. Semiconductor division no. 472-13 (Vedbaek). 1968. P. 15.
25. **Tao Y., Scharf F. H.** Revisiting the Effect of Nickel Characteristics on High-Speed Interconnect Performance // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 2016. Vol. 64, N. 8. P. 2447—2453.
26. **Ott H.** Electromagnetic Compatibility Engineering. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons. 2009. P. 243—252.
27. **Ширшова В. А.** Поли-пара-ксилилены. История разработки, современное состояние и перспективы развития технологии // Лакокрасочные материалы и их применение. 2008. № 1—2. С. 44—47.
28. **Namsheer K., Rout C. S.** Conducting polymers: a comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications // RSC Advances. 2021. Vol. 11, N. 10. P. 5659—5697.
29. **Martin D. C.** Molecular design, synthesis, and characterization of conjugated polymers for interfacing electronic biomedical devices with living tissue // MRS communications. 2015. Vol. 5, N. 2. P. 131—153.
30. **Gareev K. G., Khmelniitskiy I. K., Aivazyan V. M.** et al. Producing and investigation of radiation-absorbent coatings based on conductive polymers // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1281. P. 012018-1—012018-5.
31. **Gareev K. G., Bagrets V. S., Khmelniitskiy I. K.** et al. Research and Development of "Gelatin—Conductive Polymer" Composites for Electromagnetic Compatibility // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg/Moscow, Russia, 27—30 January 2020. P. 1069—1072.
32. **ГОСТ 22372—77.** Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до $5 \cdot 10^6$ Гц.

O. A. Testov, Electronic engineer, e-mail: otestov@mail.ru, **K. G. Gareev**, Associate Professor, Ph. D., kggareev@yandex.ru, **A. E. Komlev**, Associate Professor, Ph. D., a.komlev@mail.ru, **V. V. Luchinin**, Head of Department, Professor, Dr. Sci., cmid_leti@mail.ru, **D. O. Testov**, Postgraduate Student, Engineer, dtestov@bk.ru, **I. O. Testov**, Postgraduate Student, Engineer, igortestov1999@mail.ru, **I. K. Khmelniitskiy**, Ph. D., Leading Researcher, khmelniitskiy@gmail.com, Saint-Petersburg Electrotechnical University (ETU "LETI"), 197376 St. Petersburg, Russian Federation

Corresponding author:

Gareev Kamil G., Associate Professor, Ph. D., Saint-Petersburg Electrotechnical University (ETU "LETI"), St. Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: kggareev@yandex.ru

Conformal Integrated Micro- and Nanocomposite Passive Electromagnetic Protection of Biotechnosphere Objects

*Received on August 26, 2021
Accepted on September 14, 2021*

The paper proposes physical-technological solutions that provide passive protection of miniature wearable objects of the bio- and technosphere from the effects of electromagnetic radiation in the frequency range from 50 MHz to 18 GHz. Various conformal micro- and nanocompositions of electromagnetic shields and electromagnetic wave absorbers have been proposed and studied.

Keywords: electromagnetic shield, absorber of electromagnetic waves, conformity, film, metal, polymer, carbon, plastic, hydrogel, composite

Acknowledgement. This work has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF N 21-19-00719.

For citation:

Testov O. A., Gareev K. G., Komlev A. E., Luchinin V. V., Testov D. O., Testov I. O., Khmel'nikskiy I. K. Conformal Integrated Micro- and Nanocomposite Passive Electromagnetic Protection of Biotechnosphere Objects, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 143–153.

DOI: 10.17587/nmst.24.143-153

References

1. **GOST 30372—2017.** Electromagnetic compatibility of technical means. Terms and definitions (in Russian).
2. **GOST R 50011—92.** Electromagnetic wave absorbers for shielded cameras. General technical conditions (in Russian).
3. **Shapiro D. N.** *Electromagnetic shielding: Scientific edition*, Moscow, Publishing House "Intellect", 2010, 120 p. (in Russian).
4. **Kovar S., Valouch J., Urbancokova H.** Calculation of Shielding Effectiveness of Materials for Security Devices, *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 125, pp. 02036-1—02036-4.
5. **GOST R 51317.2.5—2000.** Electromagnetic compatibility of technical means. Electromagnetic environment. Classification of electromagnetic interference in the locations of technical means (in Russian).
6. **Petrov V. V., Nikolaichuk G. A., Lutsev L. V., Yakovlev S. V.** Multipurpose radio-absorbing materials based on magnetic nanostructures: preparation, properties and application, *Components and Technologies*, 2008, no. 10, pp. 147—150 (in Russian).
7. **Tarala V. A., Sinel'nikov B. M., Titarenko A. A., Belashov, I. V., Shevchenko M. Yu., Sokol A. A.** Influence of the substrate pressure and potential on the properties of diamond-like carbon films, *Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 6, no. 3, pp. 18—26 (in Russian).
8. **Nikolaichuk G. A., Moroz O. Yu., Dunaevsky S. M.** Electrical properties of film nanocomposites based on amorphous hydrogenated carbon, *Journal of Technical Physics*, 2018, vol. 88, is. 11, pp. 1672—1677 (in Russian).
9. **Barchenko V. T., Bykov Yu. O., Efremenko A. M., Luchinin V. V., Testov O. A.** Technological module for obtaining nanocluster coatings, *Vacuum engineering and technologies*, 2008, vol. 18, no. 2, pp. 129—134 (in Russian).
10. **Barchenko V. T., Bykov Yu. O., Grebnev O. G., Efremenko A. M., Luchinin V. V., Testov O. A.** A device for applying a nanocluster coating. Patent of the Russian Federation No. 2362838 dated 09.10.2007 (in Russian).
11. **Luchinin V. V., Alekseev A. G., Bykov Yu. O., Efremenko A. M., Kozyrev S. V., Testov O. A.** Radio-absorbing coating. Patent of the Russian Federation No. 68190 dated 26.06.2007 (in Russian).
12. **Alekseev A. G., Starostin A. P., Yakovlev S. V., Lutsev L. V., Kozyrev S. V.** Radio-absorbing coating and the method of its preparation. Patent of the Russian Federation No. 2228565 dated 19.12.2002 (in Russian).
13. **Semikhina L. P.** Dielectric and magnetic properties of water in aqueous solutions and biological objects in weak electromagnetic fields, Tyumen, TSU, 2005, 173 p. (in Russian).
14. **Didenko A. N., Dmitriev M. S., Lalayan M. V.** Abnormal absorption of electromagnetic waves of the ten-centimeter range in water, *Radio Engineering and electronics*, 2012, vol. 57, no. 7, pp. 734—741 (in Russian).
15. **Gareev K. G., Reinyuk A. V., Testov D. O., Luchinin V. V., Moshnikov V. A.** Method of obtaining a magnetic liquid. Patent of the Russian Federation No. 2639709 dated 29.03.2017 (in Russian).
16. **Gareev K. G., Luchinin V. V., Sevostyanov E. N., Testov I. O., Testov O. A.** Frequency Dependence of an Electromagnetic Absorption Coefficient in Magnetic Fluid, *Tech. Phys.*, 2019, vol. 64, pp. 893—896.
17. **Gareev K. G., Luchinin V. V., Testov I. O., Testov O. A., Khmel'nikskiy I. K.** Electromagnetic screen. Patent of the Russian Federation No. 2688894 dated 20.06.2018 (in Russian).
18. **Koritsky Yu. V., Pasinkov V. V., Tareev B. M.** (Eds.) Handbook of electrical materials, Leningrad, Energoatomizdat Leningradskoe otd., 1988, 728 p. (in Russian).
19. **Jordan L., Swanger W. H.** The properties of pure nickel, *Bureau of Standards Journal of Research*, 1930, vol. 5, no. 6, p. 1291.
20. **Dizenko E. I., Novoselov V. F., Tugunov P. I., Yufin V. A.** Anticorrosive protection of pipelines and reservoirs, Moscow, Nedra, 1978, 199 p. (in Russian).
21. **Zhuk N. P.** Course of the theory of corrosion and protection of metals, Moscow, Metallurgy, 1976, 472 p. (in Russian).
22. **GOST 19241—2016.** Nickel and low-alloy nickel alloys processed by pressure. Stamps.
23. **Smits F. M.** Measurement of sheet resistivities with the four-point probe, *Bell System Technical Journal*, 1958, vol. 37, is. 3, pp. 711—718.
24. **Topsoe H.** Geometric Factors in Four Point Resistivity Measurement. *Semiconductor division no. 472-13 (Vedbaek)*, 1968, p. 15.
25. **Tao Y., Scharf F. H.** Revisiting the Effect of Nickel Characteristics on High-Speed Interconnect Performance, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 2016, vol. 64, no. 8, pp. 2447—2453.
26. **Ott H.** *Electromagnetic Compatibility Engineering*, Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley & Sons, 2009, pp. 243—252.
27. **Shirshova V. A.** Poly-para-xylenes. History of development, current state and prospects of technology development, *Paint and varnish materials and their application*, 2008, no. 1—2, pp. 44—47 (in Russian).
28. **Namsheer K., Rout C. S.** Conducting polymers: a comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications, *RSC Advances*, 2021, vol. 11, no. 10, pp. 5659—5697.
29. **Martin D. C.** Molecular design, synthesis, and characterization of conjugated polymers for interfacing electronic biomedical devices with living tissue, *MRS communications*, 2015, vol. 5, no. 2, pp. 131—153.
30. **Gareev K. G., Khmel'nikskiy I. K., Aivazyan V. M., Golubkov V. A., Ivanitsa M. G., Kunitsyn A. S., Lagosh A. V., Mikhailova O. N., Reinyuk A. V., Testov D. O., Testov I. O., Testov O. A.** Producing and investigation of radiation-absorbent coatings based on conductive polymers, *Journal of Physics: Conf. Series*, 2019, vol. 1281, pp. 012018-1—012018-5.
31. **Gareev K. G., Bagrets V. S., Khmel'nikskiy I. K., Ivanitsa M. G., Testov D. O.** Research and Development of "Gelatin—Conductive Polymer" Composites for Electromagnetic Compatibility, *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg/Moscow, Russia, 27—30 January 2020*, pp. 1069—1072.
32. **GOST 22372—77.** The materials are dielectric. Methods for determining the permittivity and the tangent of the dielectric loss angle in the frequency range from 100 to $5 \cdot 10^6$ Hz (in Russian).

Е. Е. Макарова, инженер, e-mail: makarova@tcen.ru, **В. В. Амеличев**, канд. техн. наук, нач. отдела, e-mail: avv@tcen.ru, **Д. В. Костюк**, нач. НИЛ, e-mail: D.Kostyuk@tcen.ru, **Д. В. Васильев**, науч. сотр., e-mail: D.Vasilyev@tcen.ru, **Ю. В. Казаков**, науч. сотр., e-mail: madvcat@gmail.com, **Е. П. Орлов**, науч. сотр., e-mail: E.Orlov@tcen.ru
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
"Научно-производственный комплекс "Технологический центр"
(НПК "Технологический центр"), 124498, г. Москва, Зеленоград

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕСТОВЫХ ЯЧЕЕК ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ МАГНИТОРЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ

Поступила в редакцию 21.12.2021

Представлен алгоритм работы макета контрольно-измерительного стенда, позволяющий исследовать спин-туннельные магниторезистивные (СТМР) элементы тестовой ячейки энергонезависимой магниторезистивной памяти. Получены значения тока записи СТМР элемента для строки 40 мА, для столбца 67 мА.

Ключевые слова: энергонезависимая память, MRAM, спин-туннельный переход, спин-туннельный магниторезистивный эффект, контрольно-измерительный стенд

Введение

В настоящее время в России и мире повышается спрос на энергонезависимую память. Все больше компаний инвестируют значительную долю средств в разработку энергонезависимой памяти. В области разработок нового поколения энергонезависимой памяти, которая может стать универсальной системной памятью, выделяют три основных типа: фазовую (*phase-change memory* — *PCM*), магниторезистивную (*magnetoresistive random-access memory* — *MRAM*) и сегнетоэлектрическую оперативную память (*ferroelectric random-access memory* — *FeRAM*).

Запись, хранение и считывание информации в *PCM* основано на изменении электрического сопротивления малого объема халькогенидного сплава при обратимом фазовом переходе. *PCM* энергонезависима, выдерживает число циклов перезаписи $\sim 10^6$, имеет высокую скорость доступа и малое энергопотребление [1]. Основными проблемами *PCM* являются требование высокой плотности программируемого тока и необходимость создания элементов памяти большого размера, ввиду того, что они подвергаются нагреву и склонны к произвольному фазовому переходу.

Принцип работы *FeRAM* основан на эффекте гистерезиса в сегнетоэлектрике. При действии положительного электрического заряда происходит положительная поляризация сегнетоэлектрика, результатом которой является переход в состояние, соответствующее значению "0". При действии отрицательного электрического заряда происходит обратный переход, соответствующий значению "1". При этих переходах материал сегнетоэлектрика

меняет свои физические свойства и изменяются параметры элемента. Число циклов перезаписи — не менее 10^{12} , время записи — 150 нс, время хранения информации — 10 лет [2]. Недостатком *FeRAM* является довольно малая плотность хранения данных, следовательно, ограниченная емкость накопителей; ее сложнее производить, так как при изготовлении кремниевых чипов сегнетоэлектрический слой может быть разрушен.

Функционирование элемента *MRAM* основано на скачкообразном изменении сопротивления спин-туннельного перехода (СТП) при воздействии магнитного поля. СТП состоит из тонкой диэлектрической пленки (туннельного барьера), которая находится между двумя ферромагнитными слоями [3–5]. Один из ферромагнитных слоев имеет свободную ориентацию намагниченности слоя, другой ферромагнитный слой — фиксированную ориентацию. СТМР элемент может хранить 1 бит информации в виде направления намагниченности свободного слоя. Записываемые "0" и "1" бит соответствуют параллельному и антипараллельному расположению векторов намагниченности свободного и фиксированного слоев [5, 6].

MRAM имеет ряд преимуществ по сравнению с другими перспективными видами энергонезависимой памяти и является одним из самых быстродействующих типов памяти с циклом чтения/записи на уровне 35 нс [7]. СТМР элемент может перезаписывать информацию неограниченное число раз. *MRAM* обладает высокой стойкостью к специальным внешним воздействующим факторам, включая стойкость к тяжелым заряженным частицам космического пространства [7]. Комбинация

описанных характеристик объясняет большое число исследовательских работ в области исследования и разработки *MRAM*.

В НПК "Технологический центр" была реализована тестовая ячейка *MRAM*. Для исследования был разработан и изготовлен макет контрольно-измерительного стенда (КИС). Основными исследуемыми характеристиками тестовой ячейки *MRAM* являются токи перемагничивания СТМР элемента. В настоящей работе представлены методики измерения сопротивления в изменяющемся магнитном поле, создаваемом шинами, и методы определения токов перемагничивания СТМР элемента с использованием макета КИС.

Алгоритм работы макета контрольно-измерительного стенда

Разработанный и изготовленный в НПК "Технологический центр" макет КИС предназначен для записи, чтения и исследования $R(I)$ характеристик элементов тестовой ячейки *MRAM* с возможностью передачи данных через *USB*-порт на персональный компьютер. Структурная схема представлена на рис. 1. Устройство может выполнять следующие функции:

- запись, чтение и обработка данных тестовой ячейки *MRAM*;
- передача данных через *USB*-порт на персональный компьютер;
- построение $R(I)$ характеристик СТМР элементов тестовой ячейки *MRAM*.

Макет тестовой ячейки *MRAM* состоит из СТМР элементов, образующих матрицу из строк и столб-

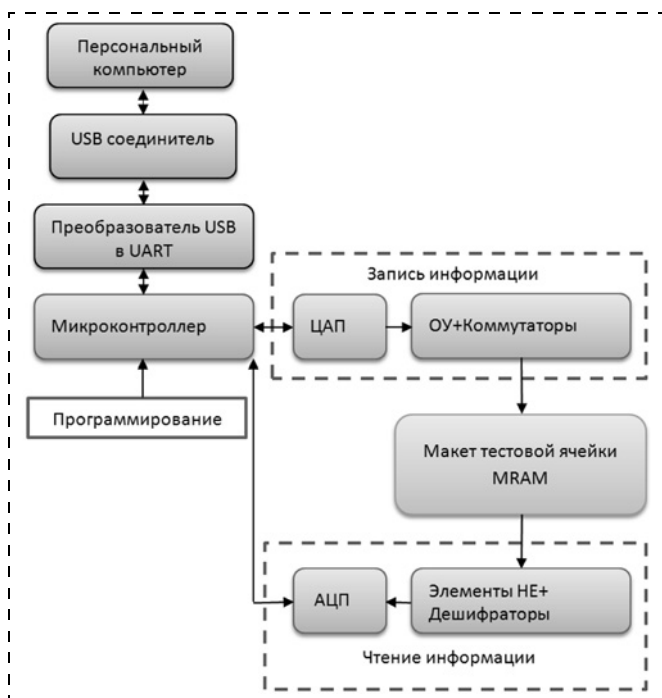


Рис. 1. Структурная схема макета КИС

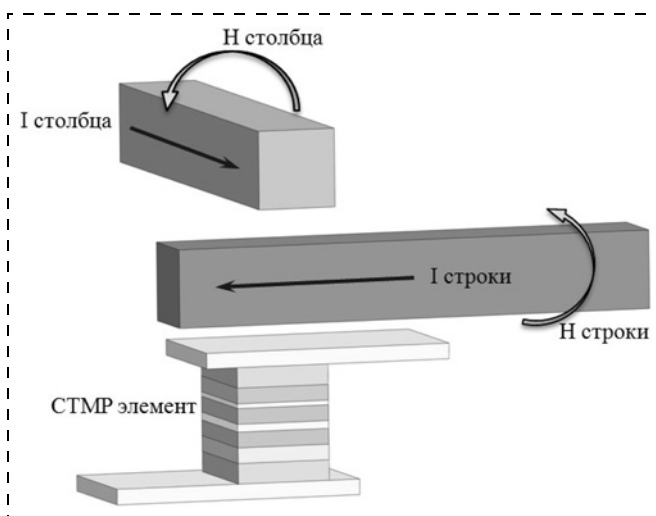


Рис. 2. Элемент тестовой ячейки *MRAM*

цов. Над СТМР элементами проходят алюминиевые шины, по которым подают импульсы электрического тока для записи. Состояние (сопротивление) каждого СТМР элемента изменяется при воздействии магнитного поля, создаваемого электрическим током в шинах. Каждый СТМР элемент хранит в себе 1 бит информации "0" или "1".

Запись, чтение и исследование $R(I)$ характеристик СТМР элементов памяти обеспечивает микроконтроллер, на который приходят команды с персонального компьютера через *USB*-порт. Ток в шины задается с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП), операционных усилителей и коммутаторов. Выбор СТМР элемента для измерения сопротивления проводят дешифраторы и микросхемы с элементами "НЕ". Измерение обеспечивает аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Макет КИС позволяет проводить измерения зависимостей сопротивления от электрического тока в шинах. Для измерения сопротивления подается напряжение 100 мВ через заданный резистор на выбранный элемент. Напряжение на СТМР элементе измеряют, и рассчитывают его сопротивление.

Для управления макетом КИС разработаны программное обеспечение и графический интерфейс конечного пользователя.

Запись информации СТМР элемента происходит путем создания результирующего магнитного поля, направленного вдоль оси легкого намагничивания. Поле формируется путем подачи тока в ортогональные шины одновременно (рис. 2).

Конструкция СТМР элемента

Как правило, СТМР элемент включает в себя два ферромагнетика, разделенных барьерным (немагнитным) слоем, один из ферромагнитных слоев фиксируется антиферромагнетиком, создавая обменное смещение [3].

Наиболее распространенными материалами для барьерного слоя в СТМР наноструктурах являются оксиды алюминия и магния. Оксид алюминия имеет аморфную структуру, оксид магния — кристаллическую [8]. Применение оксида с кристаллической структурой позволяет электронам на границе с ферромагнетиком когерентно туннелировать, что необходимо для достижения наибольшего магниторезистивного эффекта.

Ферромагнитный слой в большинстве случаев состоит из различных сплавов Fe, Ni, Co. Основными предъявляемыми требованиями к ним являются: большое поле магнитного насыщения, термостабильность, высокий уровень спиновой поляризации. Например, сплавы CoFe и CoFeB обладают большим полем магнитного насыщения и уровнем спиновой поляризации, чем сплавы NiFe и NiFeCo, что делает их применение в качестве ферромагнитного слоя более перспективным. СТМР наноструктуры, содержащие сплавы CoFe и CoFeB, более термостабильны и имеют большее магнитосопротивление [9].

В качестве антиферромагнитного слоя применяют сплавы IrMn, FeMn, PtMn [3]. Для MRAM необходимо высокое значение температуры блокировки (температуры, при которой обменное взаимодействие на границе ферромагнетик/антиферромагнетик разрушается за счет увеличения энергии теплового движения), обеспечивающее устойчивую фиксацию ферромагнитного слоя. Сплав FeMn имеет невысокую температуру блокировки 120...190 °С, сплав IrMn — 130...290 °С, самую высокую температуру блокировки имеет сплав PtMn (340 °С) [10].

В СТМР наноструктуру добавляют синтетический антиферромагнетик (САФ) в фиксированный слой [11]. САФ представляет собой трехслойную структуру ферромагнетик/немагнитный слой/ферромагнетик с обменной связью. Благодаря наличию в этой структуре немагнитного слоя два слоя ферромагнетика могут иметь антипараллельную конфигурацию намагниченности за счет РККИ-взаимодействия (взаимодействие Рудермана — Киттеля — Касуя — Иосиды) — косвенного обменного взаимодействия между магнитными ионами, осуществляемого через коллективизированные электроны проводимости [4, 12]. При использовании только антиферромагнитного слоя для закрепления ферромагнитного слоя возникает магнитостатическое взаимодействие фиксированного и свободного слоев. Для устранения данной проблемы используют САФ. САФ применяют совместно с обычным антиферромагнетиком, чтобы направления намагниченностей в ферромагнитных слоях оставались неизменными [12, 13].

В опытном производстве НПК "Технологический центр" создана тестовая ячейка MRAM на основе СТМР элементов с наноструктурой следую-

щего состава Ta/CoFe/CoFeB/MgO/CoFeB/Ru/CoFe/IrMn/Ta [14].

Экспериментальные исследования и полученные результаты

Исследование заключалось в измерении сопротивления СТМР элемента в изменяющемся магнитном поле, создаваемом шинами, расположенными над СТМР элементом. С помощью программного обеспечения можно задавать различные соотношения значений тока строки относительно тока столбца и получать зависимости $R(I)$ массива СТМР элементов. Для перемагничивания СТМР элемента тестовой ячейки MRAM необходимо подобрать такое соотношение токов, при котором петля гистерезиса зависимости $R(I)$ будет минимальна.

На рис. 3 (см. четвертую сторону обложки) представлены полученные $R(I)$ характеристики СТМР элементов, для синей кривой соотношение тока строки к току столбца составляет 1, для красной кривой — 0,6. Вследствие неоптимального соотношения токов в шинах ширина петли синей кривой больше, чем красной. Красная кривая имеет характерную зависимость для элемента тестовой ячейки MRAM. По полученным зависимостям можно определить рабочий ток, необходимый для переключения из нуля в единицу и обратно для строки, выразив через значение отношения тока строки к току столбца, получим рабочий ток для столбца.

Из рис. 3 (см. четвертую сторону обложки), для красной кривой следует, что необходимый для переключения СТМР элемента ток, подаваемый в строку, равен 40 мА. С учетом соотношения тока строки к току столбца, равного 0,6, рассчитаем ток столбца, который составит 67 мА.

Следующий этап исследования — тестирование записи и чтения для всех или одного СТМР элементов на макете КИС. Токи записи для столбцов и строк каждого элемента, как для записи ноля, так и для записи единицы, задают в виде таблицы (рис. 4). С помощью флажка "Измерение сопротивлений" включают периодическое измерение сопротивлений всех элементов для контроля процесса записи, а флажком "Вывод dR" — режим вывода изменения сопротивлений. В группе "Параметры" вводят номера столбца и строки для подачи импульса тока. При нажатии кнопки "Update" принимаются установленные параметры.

Кнопка "Уст. бит записи" меняет бит записи с ноля на единицу и обратно. Он отображается в поле справа. Кнопкой "Вкл. на время, мкс" подается импульс тока на заданные шины на время, указанное в поле ввода справа. Флажком "Вкл./выкл." включают и выключают ток записи на длительное время.

Стабильное изменение сопротивления СТМР элементов обусловлено правильно подобранным электрическим током записи для столбца и стро-

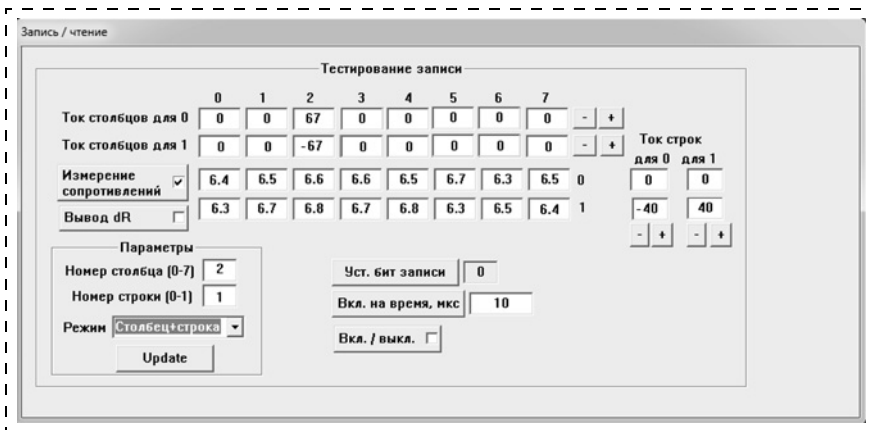


Рис. 4. Характеристики массива СТМР элементов при установке "0" бита записи

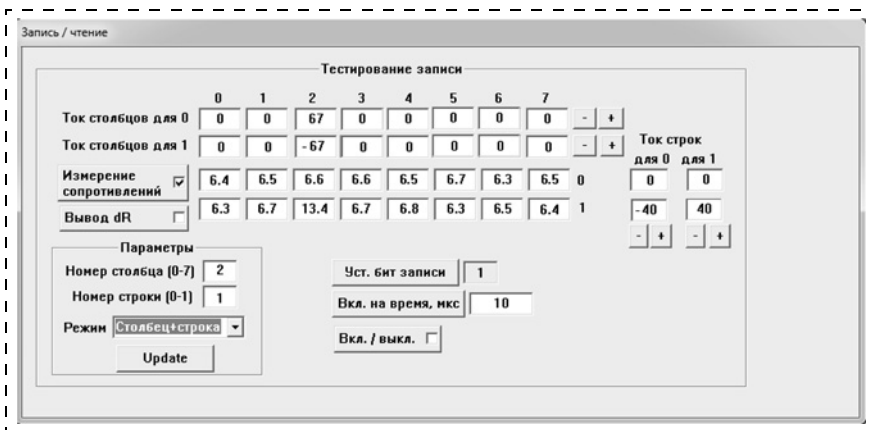


Рис. 5. Характеристики массива СТМР элементов при установке "1" бита записи

ки. На рис. 4 представлена матрица задаваемых параметров и сопротивлений элементов. В качестве изучаемого СТМР элемента был выбран элемент, находящийся на пересечении столбца 2 и строки 1, для его переключения установлен бит записи ноль. На рис. 5 показано изменение сопротивления выбранного элемента при смене установленного бита записи с нуля на единицу.

Сопротивление СТМР элемента при установлении бита записи в ноль равно 6,8 кОм, при установлении единицы — 13,4 кОм. При проведении повторного эксперимента переключения ячейки из единицы в ноль изменение сопротивления осталось таким же. Следовательно, изменение сопротивления стабильно, что подтверждает работоспособность элемента *MRAM*.

Заключение

В мире активно ведутся разработки и исследования устройств энергонезависимой памяти нового поколения. Такие характеристики, как энергонезависимость и быстродействие, число циклов чтения/записи выделяют *MRAM* среди перспективных направлений. Созданная тестовая ячейка *MRAM* на основе СТМР элементов в опытном производстве НПК "Технологический центр" была ис-

следована на макете КИС. Представленный программно-аппаратный комплекс позволяет на этапе разработки оперативно анализировать магнитные параметры полученной тестовой ячейки *MRAM*. Экспериментальные данные, полученные при исследовании элементов тестовой ячейки *MRAM*, могут способствовать разработке технологии изготовления отечественной магниторезистивной памяти.

Список литературы

1. Городецкий А. РСМ-память на основе фазового перехода // Компоненты и технологии. 2012. № 9. С. 50—51.
2. Криночкин Р. Новые микросхемы памяти FeRAM компании OKI Semiconductor // Компоненты и технологии. 2011. № 9. С. 66—70.
3. Diény B., Goldfarb R. B., Lee K.-J. Introduction to magnetic random-access memory // Magnetics. 2017. P. 255.
4. Васильев Д. В., Амеличев В. В., Костюк Д. В., Казаков Ю. В., Низелко Е. Е., Крикунов А. И. Основные конструктивно-технологические особенности MRAM // Нано- и микросистемная техника. 2020. Том 22, № 7. С. 353—361.
5. Шурыгина В. Энергонезависимая память. Кто победит в гонке? Часть 2. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. № 6. С. 36—47.
6. Романова И. Магниторезистивная память MRAM компании Everspin Technologies // Элементная база электроники. 2014. № 8 (00140). С. 72—77.
7. Бабурин С., Самоделов А. Магниторезистивная память MRAM компании Everspin Technologies // Компоненты и технологии. 2012. № 10. С. 51—54.
8. Yuasa S., Djayaprawira D. D. Giant tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with a crystalline MgO(001) barrier. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2007. Vol 40 (21). P. 337—354.
9. Parker M. R., Hossain S., Seale D., Barnard J. A., Tan M., Fujiwara H. Low-field giant magnetoresistance in Co/Cu, CoFe/Cu and CoNiFe/Cu multilayer systems // Transactions on Magnetics. 1994. Vol. 30 (2). P. 358—363.
10. Nogues J., Schuller I. K. Exchange bias // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1999. Vol. 192. P. 203—232.
11. Girt E., Richter H. J. Antiferromagnetically coupled perpendicular recording media // Transactions on Magnetics. 2003. Vol. 39. P. 2306—2310.
12. Zhu J. -G., Zheng Y. -F. Characteristics of AP bias in spin valve memory elements // Transactions on Magnetics. 1998. Vol. 34 (4). P. 1063—1065.
13. Van den Berg H. A. M., Clemens W., Gieres G., Rupp G., Schelter W., Vieth M. GMR sensor scheme with artificial antiferromagnetic subsystem // IEEE Transactions on Magnetics. 1996. Vol. 32 (5). P. 4624—4626.
14. Амеличев В. В., Резнев А. А., Васильев Д. В. Развитие технологии наноструктур со спин-туннельным магниторезистивным эффектом // Наноиндустрия. 2020. Том 13, № 6 (100). С. 332—337.

E. E. Makarova, Engineer, e-mail: makarova@tcen.ru, **V. V. Amelichev**, Ph. D., Head of Microsystem Technology Department, e-mail: avv@tcen.ru, **D. V. Kostyuk**, Head of Laboratory, e-mail: D.Kostyuk@tcen.ru, **D. V. Vasilyev**, Researcher, e-mail: D.Vasilyev@tcen.ru, **Y. V. Kazakov**, Researcher, e-mail: madvcat@gmail.com, **E. P. Orlov**, Researcher, e-mail: E.Orlov@tcen.ru
Federal State Budgetary Scientific Organization "Scientific-manufacturing complex "Technological centre", (SMC "Technological Centre"), Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation

Corresponding author:

Makarova Ekaterina E., Engineer, Federal State Budgetary Scientific Organization "Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre", (SMC "Technological Centre"), Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation.
E-mail: nizelko.k@yandex.ru

Research of Test Cells of Power-independent Magneto-resistive Memory

Received on December 21, 2021

Accepted on January 28, 2022

The new generation non-volatile memory devices are actively developed and researched. The MRAM test cell was manufactured by the Scientific-Manufacturing Complex "Technological Center". The control measuring system (CMS) was developed and manufactured for research. The article presents an algorithm for the operation of the CMS, which makes it possible to study spin-tunnel magneto-resistive (STMR) elements of a non-volatile MRAM test cell. The main investigated characteristics of the MRAM test cell are the currents at which the cell is magnetized. Methods for measuring resistance in a changing magnetic field created by the buses and determining currents for the magnetization reversal of an STMR element are presented in this article. The recording current of STMR element for the line was 40 mA, for the column was 67 mA. The next stage of the study was writing and reading of the STMR elements. The resistance of the STMR element with "0" logical state is 6,8 Ω and with "1" logical state is 13,4 Ω . The stability of the MRAM element is confirmed by performing switch operations while maintaining the levels of logical states.

Keywords: non-volatile, MRAM, spin-tunnel junction, spin-tunnel magneto-resistive effect, control measuring system

For citation:

Makarova E. E., Amelichev V. V., Kostyuk D. V., Vasilyev D. V., Kazakov Y. V., Orlov E. P. Research of Test Cells of Power-independent Magneto-resistive Memory, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 154–158.

DOI: 10.17587/nmst.24.154-158

References

1. **Gorodetskiy A.** PCM memory based on phase transition, *Komponenti i tekhnologii*, 2012, no. 9, pp. 50–51 (in Russian).
2. **Krinochkin R.** New FeRAM memory microcircuits from OKI Semiconducto, *Komponenti i tekhnologii*, 2011, no. 9, pp. 66–70 (in Russian).
3. **Dieny B., Goldfarb R. B., Lee K.-J.** Introduction to magnetic random-access memory, *Magnetics*, 2017, pp. 255.
4. **Vasiliev D. V., Amelichev V. V., Kostyuk D. V., Kazakov Yu. V., Nizelko E. E., Krikunov A. I.** Main design and technological features of MRAM, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 7, pp. 353–361 (in Russian).
5. **Shurygina V.** Nonvolatile memory. Who will win the race? Part 2, *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2008, no. 6, pp. 36–47 (in Russian).
6. **Romanova I.** Magneto-resistive memory MRAM of the company Everspin Technologies, *Elementnaya baza elektroniki*, 2014, no. 8 (00140), pp. 72–77 (in Russian).
7. **Baburin S., Samodelov A.** Magneto-resistive memory MRAM by Everspin Technologies, *Komponenti i tekhnologii*, 2012, no. 10, pp. 51–54 (in Russian).
8. **Yuasa S., Djayaprawira D.** Giant tunnel magneto-resistance in magnetic tunnel junctions with a crystalline MgO(001) barrier, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, vol. 40 (21), pp. 337–354.
9. **Parker M. R., Hossain S., Seale D., Barnard J. A., Tan M., Fujiwara H.** Low-field giant magneto-resistance in Co/Cu, CoFe/Cu and CoNiFe/Cu multilayer systems, *Transactions on Magnetics*, 1994, vol. 30 (2), pp. 358–363.
10. **Nogues J., Schuller I. K.** Exchange bias, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1999, vol. 192, pp. 203–232.
11. **Girt E., Richter H. J.** Antiferromagnetically coupled perpendicular recording media, *Transactions on Magnetics*, 2003, vol. 39, pp. 2306–2310.
12. **Zhu, J.-G., Zheng, Y.-F.** Characteristics of AP bias in spin valve memory elements, *Transactions on Magnetics*, 1998, vol. 34 (4), pp. 1063–1065.
13. **Van den Berg H. A. M., Clemens W., Gieres G., Rupp G., Schelter W., Vieth M.** GMR sensor scheme with artificial anti-ferromagnetic subsystem, *Transactions on Magnetics*, 1996, vol. 32 (5), pp. 4624–4626.
14. **Amelichev V. V., Reznov A. A., Vasiliev D. V.** Development of technology of nanostructures with spin-tunneling magneto-resistive effect, *Nanoindustriya*, 2020, vol. 13, no. 6 (100), pp. 332–337 (in Russian).

В. Д. Садков, канд. техн. наук, доц. каф. компьютерных технологий в проектировании и производстве, sadvd2016@mail.ru

А. В. Пилькевич, магистр, anton-pi@yandex.ru

Институт радиоэлектроники и информационных технологий,
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Россия

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ПОГЛОЩАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ АДАПТОАТТЕНУАТОРОВ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

Поступила в редакцию 25.01.2022

Предложены перспективные топологии, методики расчета и подгонки параметров малогабаритных поглощающих элементов адаптоаттенуаторов для поверхностного монтажа на основе однородных и кусочно-однородных резистивных структур, обеспечивающих реализацию широкого диапазона ослаблений с заданными значениями входного и выходного сопротивлений.

Исследованы топологии на основе кусочно-однородных структур, позволяющие не только сократить размеры поглощающих элементов, обеспечить высокие значения коэффициента трансформации (более 200), но и уменьшить максимальные значения градиента потенциала и плотности мощности (в среднем в 1,5 и 3 раза соответственно). Полученные результаты особенно важны для импульсного режима работы адаптоаттенуаторов.

Показано, что поглощающие элементы предложенных топологий на основе однородных резистивных структур способны обеспечить коэффициенты трансформации более 3—3,5.

Приведены методики расчета и подгонки параметров поглощающих элементов, соотношения и графики, показывающие взаимосвязь ослабления, коэффициента трансформации, снижения максимальных значений градиента потенциала и плотности мощности в зависимости от соотношения размеров и удельных сопротивлений используемых резистивных пленок.

Ключевые слова: пленочный поглощающий элемент, адаптоаттенуатор, градиент потенциала, плотность мощности, поверхностный монтаж

Введение

Широкополосные фиксированные аттенюаторы с пленочными поглощающими элементами (ПЭ) широко используют в радиоэлектронике [1]. Разновидностью аттенюаторов являются адаптоаттенюаторы, отличающиеся разными значениями входного и выходного сопротивлений (обеспечивающие трансформацию сопротивлений), что особенно интересно для устройств на базе поверхностного монтажа, гибридных и полупроводниковых интегральных схем [2—4].

ПЭ аттенюаторов и адаптоаттенюаторов могут быть построены на основе как сосредоточенных (по П- и Т-схемам), так и распределенных резистивных структур. Последние отличаются нечувствительностью к точечным дефектам и неоднородностям, разбросу технологических параметров, точностью и широкополосностью, большей устойчивостью к импульсным и температурным воздействиям [5].

Известные топологии ПЭ адаптоаттенюаторов на основе распределенных резистивных структур, разработанные ранее для коаксиальных и полосковых трактов [6], оказываются непригодными для поверхностного монтажа, где контакты по технологическим соображениям должны располагаться на противоположных сторонах подложки и охватывать ее [7, 8]. Кроме того, перспективные топологии ПЭ должны обеспечивать при заданных ослаблении и коэффициенте трансформации уменьшение максимальных значений градиентов потенциалов и плотностей мощности, что важно для устойчивой работы в импульсном режиме.

Анализ предложенных перспективных топологий ПЭ (рис. 1, а, в) адаптоаттенюаторов для поверхностного монтажа, позволяющих в малых габаритных размерах обеспечить необходимый диапазон ослаблений и коэффициентов трансформации, а также их моделирование с использованием аналитических и численных методов, является целью настоящей работы.

Методика расчета

Рассмотрим ПЭ (рис. 1, а). Для анализа методом конформных отображений [9, 10] разделим его дополнительными контактами 1 (на линии AB) и 2 (на DE) на трехконтактную прямоугольную с параметрами R_{13} , R_{12} , R_{23} П-образную схему замещения и два резистора с сопротивлениями $r_1 = \rho_1 b/c_1$ и $r_2 = \rho_2 b/c_2$ (рис. 1, б). При этом результирующая погрешность определения параметров ПЭ не превосходит 3% [11]. Сопротивление резистора r_1 может быть равно нулю, если площадь $c_1 \times b$ будет частично или полностью занята контактом 1.

Трехконтактную структуру размерами $2l$ и $h-b$ устанавливаем в плоскости Z как показано на рис. 2, а и отображаем на верхнюю полуплоскость W (рис. 2, б) [10]:

$$w = \operatorname{sn}\left(\frac{z}{(h-b)/2} K, k\right); \quad \frac{K'}{K} = \frac{2l}{(h-b)/2}; \quad (1)$$

$$\alpha = \operatorname{sn}\left(\frac{(h-b)/2 + i(2l-c_1)}{(h-b)/2} K, k\right) =$$

$$= 1/\operatorname{dn}\left[\left(1 - \frac{c_1}{2l}\right) K', k'\right].$$

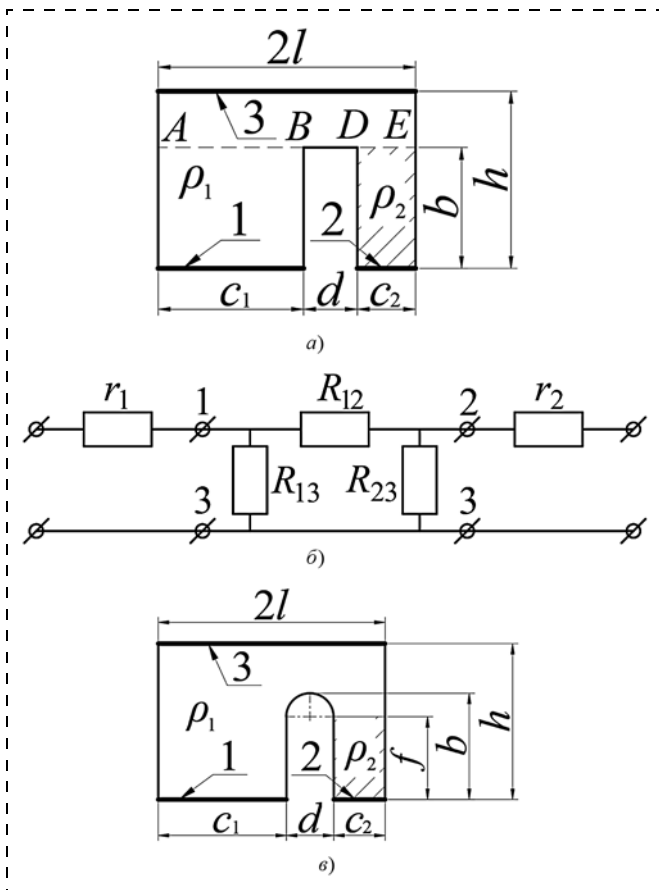


Рис. 1. Исследуемые ПЭ (а, в) и их схема замещения (б): 1, 2 — входной и выходной контакты; 3 — заземленный контакт

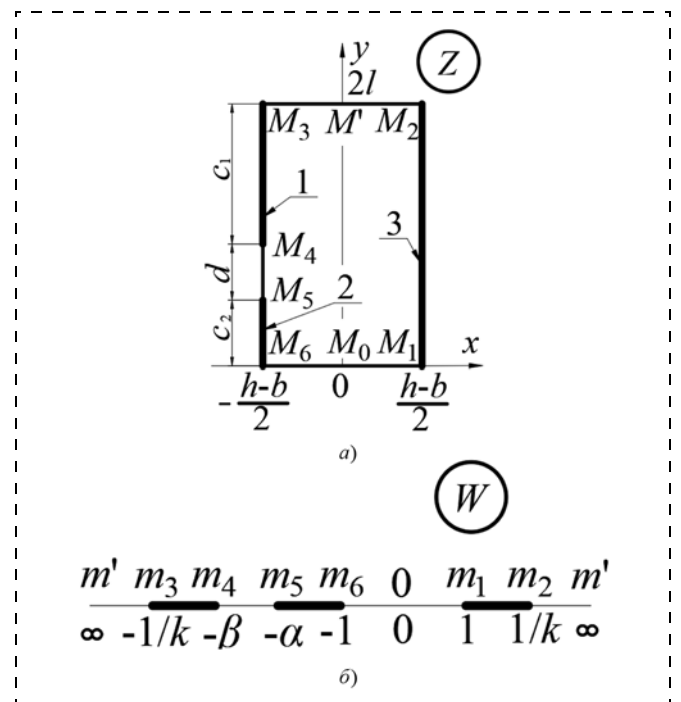


Рис. 2. Трехконтактная структура (а) и ее отображение на верхнюю полуплоскость W (б)

$$\beta = \operatorname{sn}\left(\frac{(h-b)/2 + ic_2}{(h-b)/2} K, k\right) = 1/\operatorname{dn}\left(\frac{c_2}{2l} K', k'\right).$$

Здесь использованы обозначения, принятые в теории полных эллиптических интегралов 1-го рода и эллиптических функций Якоби [10].

Значения сопротивлений П-образной схемы замещения определяют по соотношениям [10]:

$$R_{13} = \frac{\rho}{2} \frac{\det[F]}{\det[E_{21}]}; \quad R_{12} = \frac{\rho}{2} \frac{\det[F]}{\det[E_{22}]};$$

$$R_{23} = \frac{\rho}{2} \frac{\det[F]}{\det[E_{31}]}, \quad (2)$$

где $\det[F]$, $\det[E_{km}]$ — определители матриц $[F]$ и $[E_{km}]$ вида

$$[F] = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{10} \\ F_{21} & F_{20} \end{bmatrix}; \quad [E_{21}] = \begin{bmatrix} E_{21} & E_{20} \\ F_{21} & F_{20} \end{bmatrix};$$

$$[E_{22}] = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{10} \\ E_{21} & E_{20} \end{bmatrix}; \quad [E_{31}] = \begin{bmatrix} E_{31} & E_{30} \\ F_{21} & F_{20} \end{bmatrix};$$

$$F_{km} = (-1)^k \int_{b_k}^{a_{k+1}} \frac{t^m dt}{\sqrt{|R(t)|}}, \quad E_{km} = (-1)^{k+1} \int_{a_k}^{b_k} \frac{t^m dt}{\sqrt{|R(t)|}}, \quad (3)$$

$$R(t) = (t-a_1)(t-b_1)(t-a_2)(t-b_2)(t-a_3)(t-b_3),$$

$$a_1 = -1/k, \quad b_1 = -\alpha, \quad a_2 = -\beta, \quad b_2 = -1, \quad a_3 = 1,$$

$$b_3 = 1/k.$$

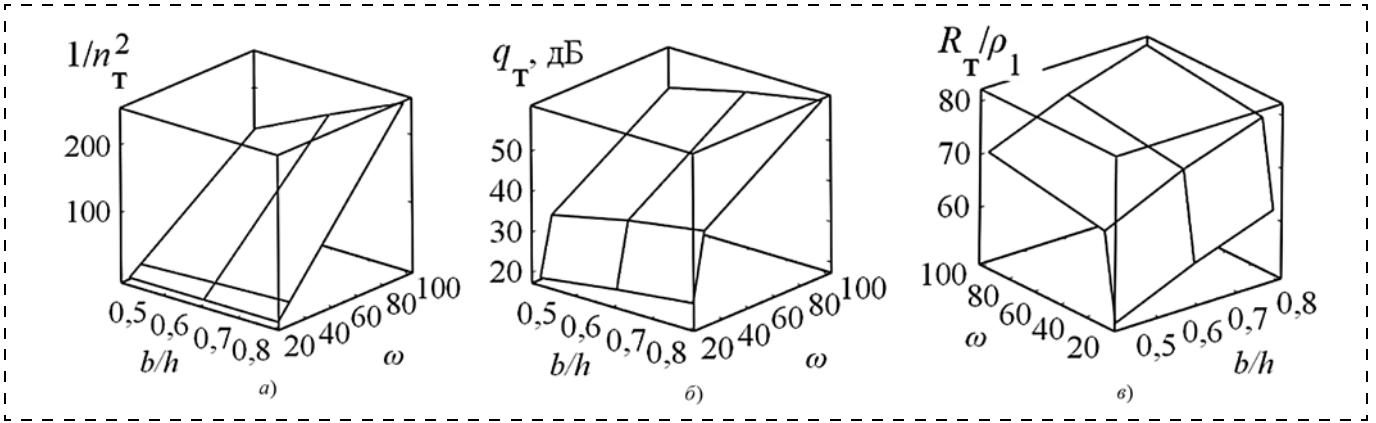


Рис. 3. Зависимость коэффициента трансформации (а), ослабления (б) и нормированного входного сопротивления (в) ПЭ (см. рис. 1, а) от ω и b/h при $h/2l = 1$; $d/2l = 0,2$; $c_1/2l = 0,6$; $c_2/2l = 0,2$

С помощью подстановок $t = x(b_k - a_k)/2 + (b_k + a_k)/2$ для E_{km} и $t = x(a_{k+1} - b_k)/2 + (a_{k+1} + b_k)/2$ для F_{km} гиперэллиптические интегралы (3) приводят к стандартному интервалу интегрирования и вычисляются с использованием квадратурной формулы наивысшей степени точности [12]:

$$\int_{-1}^1 \frac{g(x)dx}{\sqrt{1-x^2}} = \frac{\pi}{N} \sum_{n=1}^N g\left(\cos \frac{2n-1}{2N} \pi\right) + R_N(g),$$

$$R_N(g) = \frac{\pi}{N} \frac{g^{2N}(\eta)}{2N!}, \quad -1 < \eta < 1.$$

В частном случае $c_1 = c_2 = c$ соотношения (1)–(3) упрощаются и позволяют получить аналитические решения для R_{13} , R_{12} , R_{23} [10]:

$$\begin{aligned} R_{13} &= R_{23} = \rho_1 K'(m_1)/K(m_1); \\ R_{12} &= 2\rho_1/[K'(m)/K(m) - K(m_1)/K'(m_1)]; \\ m_1 &= k \operatorname{sn}[cK(k)/l, k]; \quad m = \operatorname{cn}[cK(k)/l, k], \\ K'(k)/K(k) &= 4l/(h-b) = \mu. \end{aligned}$$

В практически важном случае при $\mu > 3$ соотношения для m_1 и m вырождаются в более простые: $m_1 = \operatorname{th}[(\pi c/2l)\mu]$, $m = 1/\operatorname{ch}[(\pi c/2l)\mu]$.

После приведения схемы замещения (см. рис. 1, б) к П-образной и вычисления ее параметров R_1 , R_3 (вертикальные плечи) и R_2 (горизонтальное плечо) коэффициент трансформации n^2 , входное $R_{\text{вх}}$, выходное $R_{\text{вых}}$ сопротивления и ослабление q ПЭ (см. рис. 1, б) вычисляются по известным соотношениям [13]:

$$n^2 = (1 + R_2/R_3)/(1 + R_2/R_1); \quad (4)$$

$$\begin{aligned} R_{\text{вх}} &= R_1 \sqrt{\frac{1 + R_3/R_2}{1 + R_1/R_2}} \sqrt{\frac{1}{1 + R_1/R_2 + R_3/R_2}}; \\ R_{\text{вых}} &= R_3 \sqrt{\frac{1 + R_1/R_2}{1 + R_3/R_2}} \sqrt{\frac{1}{1 + R_1/R_2 + R_3/R_2}}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} q &= 20 \lg[\sqrt{(1 + R_2/R_3)(1 + R_2/R_1)} + \\ &+ \sqrt{(1 + R_2/R_3)(1 + R_2/R_1) - 1}], \text{ дБ}, \end{aligned} \quad (6)$$

или

$$\begin{aligned} q &= 20 \lg[(1 + R_2/R_1)\sqrt{n^2} + \\ &+ \sqrt{n^2(1 + R_2/R_1)^2 - 1}], \text{ дБ}. \end{aligned}$$

Минимально реализуемое адаптоаттенуатором ослабление (в предельном случае $R_2/R_1 \approx 0$) так связано с коэффициентом трансформации:

$$q = 20 \lg[\sqrt{n^2} + \sqrt{n^2 - 1}], \text{ дБ}.$$

Результаты расчетов приведены на рис. 3. Они показывают, что обратная коэффициенту трансформации величина $1/n^2 = R_{\text{вых}}/R_{\text{вх}}$ (коэффициент трансформации с выхода на вход) для ПЭ с однородной пленкой не превосходит 3–3,5. При использовании кусочно-однородной пленки величина $1/n^2$ сильно зависит от степени неоднородности $\omega = \rho_2/\rho_1$ (при $\omega \approx 100$, значение $1/n^2$ может достигать 200), возрастает также и отношение b/h с увеличением степени асимметрии c_1/c_2 ПЭ.

Отметим, что вблизи угловых точек B и D (см. рис. 1, а) структура поля характеризуется большими значениями градиентов потенциалов, что снижает надежность работы ПЭ в импульсном режиме и делает целесообразным рассмотрение ПЭ со скруглениями (см. рис. 1, в). Расчет такого ПЭ оказывается более громоздким, так как после его разделения (аналогично ПЭ на рис. 1, а) отображение трехконтактной структуры вида рис. 2, а с вырезом между контактами 1 и 2 радиусом $d/2$ приводит после отображения (1) к появлению в верхней полуплоскости W выреза между точками m_4 и m_5 , близкого к полуэллипсу.

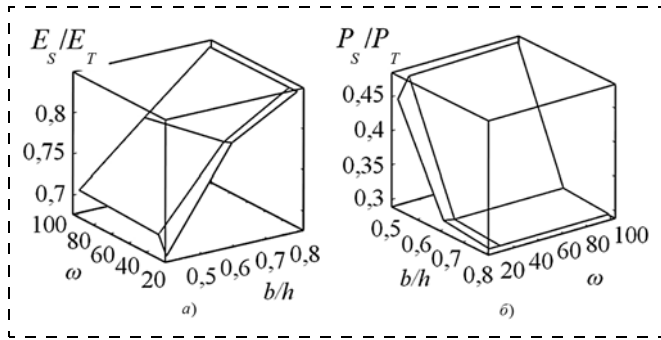


Рис. 4. Зависимость отношения максимальных значений градиента потенциала (а) и плотности мощности тепловыделения (б) ПЭ рис. 1, в (E_s и P_s) и ПЭ рис. 1, а (E_T и P_T) от ω и b/h при $h/2l = 1$; $d/2l = 0,2$; $c_1/2l = 0,6$; $c_2/2l = 0,2$

Максимальная высота полуэллипса c в плоскости W определяется из соотношения

$$c = \text{cn}(\gamma K, k) \text{dn}(\gamma K, k) \text{sn}(\delta K', k') \text{cn}(\delta K', k') / A;$$

$$A = \text{cn}^2(\delta K', k') + k'^2 \text{sn}^2(\delta K', k') \text{sn}^2(\gamma K, k);$$

$$\gamma = 1 - d/(h - b), \delta = (c_2 + d/2)/(2l).$$

Устранение выреза проводим методом исчерпывания [14]. Для этого переносим начало координат в середину отрезка $m_4 m_5$ (см. рис. 2, б) и отображаем полуплоскость W на новую полуплоскость ξ с помощью функции $\xi = w - c(w^2 + c^2 - p^2)^{1/2}/p$, $p = (\beta - \alpha)/2$ и определяем изменившееся положение граничных точек контактов (см. рис. 2, б).

После этого определяем параметры R_{12} , R_{13} , R_{23} по (2), (3) и r_1 , r_2 схемы замещения (см. рис. 1, б) ПЭ, преобразуем ее в П-образную [13] и определяем по (4)–(6) все параметры.

Результаты анализа приведены на рис. 4. Скругление вблизи угловых точек B и D практически не сказывается на значениях ослабления, входного сопротивления, снижая коэффициент трансформации примерно на 15 % при больших ω и прежнем характере его зависимости от ω и b/h . При этом максимальные значения градиента потенциала и плотности мощности снижаются в среднем в 1,5 и 3 раза соответственно.

Определение и коррекция параметров ПЭ

Использование кусочно-однородных структур требует, как правило, проведения дополнительной операции коррекции параметров ПЭ, для которой удобно использовать П-образную схему замещения с сопротивлением R_2 в горизонтальной ветви и сопротивлениями R_1 и R_3 в вертикальных ветвях входа и выхода соответственно.

Параметры схемы замещения находят путем последовательного замыкания контактов 1–2, 1–3 и 2–3 ПЭ, измерения получающихся сопротивлений

r_{12} , r_{13} , r_{23} и решения простой системы из трех уравнений:

$$1/R_1 = 0,5(1/r_{12} + 1/r_{23} - 1/r_{13});$$

$$1/R_2 = 0,5(1/r_{23} + 1/r_{13} - 1/r_{12});$$

$$1/R_3 = 0,5(1/r_{13} + 1/r_{12} - 1/r_{23}).$$

После вычисления параметров $R_1 - R_3$ схемы замещения проводят их коррекцию до требуемых значений с учетом заданных допусков на параметры ПЭ. При необходимости коэффициент трансформации n^2 , входное, выходное сопротивления и ослабление ПЭ вычисляют по соотношениям (4)–(6).

Как правило, введение лазерного реза оказывает влияние на все параметры схемы замещения ПЭ. Наименьшее влияние на другие параметры оказывает введение резов слева вблизи контакта 1 (подгонка R_1), справа вблизи контакта 2 (подгонка R_3) и снизу вверх от середины линии BD (подгонка R_2). Подрезка контакта 3 слева и справа и введение реза от контакта 3 вниз в направлении середины линии BD , помимо изменения основного подгоняемого параметра, оказывают влияние и на все другие. Опыт показывает, что для подгонки достаточно введения лазерных резов на глубину не более 10–15 % от соответствующего размера. В этом случае влияние на другие параметры ПЭ, кроме подгоняемого, становится слабым.

Последовательность подгонки заключается в следующем. Подрезкой контакта 3 слева и справа грубо корректируют параметры R_1 и R_3 , прорезью от середины линии BD вверх обеспечивается требуемое значение R_2 , а затем резами на небольшую глубину контактов 1 и 2 — параметры R_1 и R_3 . Технологические подробности изготовления и подгонки резистивных элементов изложены в работах [15–18].

Проверку расчетных соотношений и методики подгонки проводили моделированием рассмотренных топологий ПЭ в программном комплексе *Elcut* версии 5.1 [19] (расхождение результатов не превышало 3 %) и измерениями на реальных образцах тонкопленочных ПЭ на подложке из нитрида алюминия с размерами $2 \times 2 \times 0,25$ мм и коэффициентами трансформации 1,5, 3, 6, 12.

Заключение

Предложены перспективные топологии, методики расчета и подгонки малогабаритных ПЭ адаптаторов для поверхностного монтажа на основе однородных и кусочно-однородных резистивных структур, позволяющие не только обеспечить реализацию широкого диапазона коэффициентов трансформации (1...200) с заданными ослаблениями, но и уменьшить максимальные значения градиента потенциала и плотности мощности в среднем в 1,5 и 3 раза соответственно. Полученные

результаты существенны для работы ПЭ в импульсном режиме, в котором мгновенные значения градиента потенциала и выделяющейся мощности на порядки превышают значения, соответствующие непрерывному режиму, а локальные перегревы не успевают выравняться. Это может привести не только к понижению температурной стабильности и надежности, но и выгоранию отдельных участков резистивной пленки ПЭ.

Результаты расчетов проверены моделированием в отечественном программном комплексе *Elcut* и измерениями на реальных образцах разработанных ПЭ адаптоаттенуаторов.

Список литературы

1. Белов Л. Аттенуаторы СВЧ-сигналов. Обзор // Электроника: НТБ. 2006. № 2. С. 32–38.
2. Викулов А. Аттенуаторы. Краткий обзор // Электронные компоненты. 2016. № 11. С. 50–53.
3. Кочемасов В., Белов Л. Фиксированные аттенуаторы — производители и характеристики. Ч. 1 // Электроника НТБ. 2017. № 6. С. 108–116.
4. Данилин В. Н., Кушниренко А. И., Петров Г. В. Аналоговые полупроводниковые интегральные схемы СВЧ. М.: Радио и связь, 1985. 216 с.
5. Львов А. Е., Рудоясова Л. Г., Шишков Г. И., Щербakov В. В. Тонкопленочные полосковые аттенуаторы // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2014. № 5. С. 40–46.
6. Садков В. Д. Тонкопленочные звенья затухания с трансформацией сопротивлений // Известия вузов СССР. Радиоэлектроника. 1978. Т. XXI. № 7. С. 120–122.
7. Уткин В. Н., Садков В. Д., Якимов Д. Ю. Расчет Т-образных поглощающих элементов чип-аттенуаторов для по-

верхностного монтажа // Известия вузов. Электроника. 2008. № 1. С. 86–88.

8. Садков В. Д., Якимов Д. Ю. Расчет П-образных поглощающих элементов чип-аттенуаторов для поверхностного монтажа // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2009. № 10. С. 76–80.

9. Лаврик В. И., Фильчакова В. П., Яшин А. А. Конформные отображения физико-топологических моделей. Киев: Наукова думка, 1990. 373 с.

10. Ямпурин Н. П., Широков В. Д., Садков В. Д., Потехин В. А. Современные проблемы радиоэлектроники с позиций теории конформных отображений. Арзамас, АГПИ. 2014. 209 с.

11. Мартюшов К. И., Зайцев Ю. В., Тихонов А. И. Методы расчета резисторов. М.: Энергия, 1971. 208 с.

12. Крылов В. И. Приближенное вычисление интегралов. М.: Наука, 1967. 500 с.

13. Татур Г. А. Основы теории электрических цепей (справочное пособие): Учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1980. 271 с.

14. Фильчаков П. Ф. Приближенные методы конформных отображений: Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1964. 531 с.

15. Гудков А. Г., Попов В. В. Повышение надежности и качества ГИС и МИС СВЧ. Кн. 1. М.: ООО "Автотест", 2012. 212 с.

16. Седаков А. Ю., Смолин В. К. Тонкопленочные элементы в микроэлектронике: основы проектирования и изготовления. М.: Радиотехника, 2011. 168 с.

17. Спирин В. Г. Тонкопленочные микросборки высокой плотности упаковки. Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2015. 296 с.

18. Лугин А. Н. Конструкторско-технологические основы проектирования тонкопленочных прецизионных резисторов. Пенза: Информационно-издательский центр ПензГУ, 2008. 288 с.

19. Программный комплекс *Elcut*. Сайт компании ООО "Тор": www.tor.ru.

V. D. Sadkov, Ph. D., Assoc. Prof. of the Computer Aided Design and Manufacturing Department, Institute of Radio Engineering and Information Technologies, R. Y. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, sadvd2016@mail.ru

A. V. Pilkevich, Master, Institute of Radio Engineering and Information Technologies, R. Y. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Industrial Engineer, Branch of the Federal State Unitary Enterprise "Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics" "Yu. E. Sedakov Research Institute of Measuring Systems", anton-pi@yandex.ru

Corresponding author:

Sadkov Viktor D., Ph. D., Assoc. Prof. of the Computer Aided Design and Manufacturing Department, Institute of Radio Engineering and Information Technologies, R. Y. Alekseev. Nizhny Novgorod State Technical University, E-mail: sadvd2016@mail.ru

Small-sized Absorbing Elements of Adaptor Attenuators for Surface Mounting

Received on January 25, 2022

Accepted on February 18, 2022

Promising topologies, methods of calculation and adjustment of parameters of small-sized absorbing elements of adaptor attenuators for surface mounting based on homogeneous and piecewise homogeneous resistive structures providing the implementation of a wide range of attenuations with specified values of input and output resistances are proposed.

Topologies based on piecewise homogeneous structures have been studied, allowing not only to reduce the size of the absorbing elements, to ensure high values of the transformation coefficient (more than 200), but also to reduce the maximum values of the potential gradient and power density (on average by 1.5 and 3 times, respectively). The results obtained are especially important for the pulse mode of operation of adaptor attenuators.

It is shown that the absorbing elements of the proposed topologies based on homogeneous resistive structures are not able to provide transformation coefficients of more than 3–3,5.

The methods of calculation and adjustment of the parameters of absorbing elements, ratios and graphs showing the relationship of attenuation, transformation coefficient, reduction of the maximum values of the potential gradient and power density depending on the ratio of the sizes and resistivity of the resistive films used are given.

Keywords: film absorbing element, adaptoattenuator, potential gradient, power density, surface mounting

For citation:

Sadkov V. D., Pilkevich A. V. Small-Sized Absorbing Elements of Adaptol Attenuators for Surface Mounting, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 159 —164.

DOI: 10.17587/nmst.24.159-164

References

1. **Belov L.** Attenuators of microwave signals. Review, *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, 2006, no. 2, pp. 32–38 (in Russian).
2. **Vikulov A.** Attenuators. A brief overview, *Electronnii komponenti*, 2016, no. 11, pp. 50–53 (in Russian).
3. **Kochemasov V., Belov L.** Fixed attenuators-manufacturers and specifications. Part 1. *Elektronika: NTB*, 2017, no. 6, pp. 108–116 (in Russian).
4. **Danilin V. N., Kushnirenko A. I., Petrov G. V.** Analog semiconductor integrated circuits of microwave, Moscow, Radio i svyaz, 1985. 216 p. (in Russian).
5. **Lvov A. E., Rudoyasova L. G., Shishkov G. I., Shcherbakov V. V.** Thin-film Strip Attenuators, *Works of NSTU named after R. E. Alekseev*, 2014, no. 5, pp. 40–46. (In Russian).
6. **Sadkov V. D.** Thin-film attenuation links with resistance transformation, *Proceedings of Universities USSR — Radioelectronics*, 1978, vol. XXI, no. 7, pp. 120–122 (in Russian).
7. **Utkin V. N., Sadkov V. D., Yakimov D. Y.** Calculation of the T-shaped absorbing elements of chip-attenuators for surface mounting, *Proceedings of Universities. Electronics*, 2008, no. 1, pp. 86–88 (in Russian).
8. **Sadkov V. D., Yakimov D. Yu.** Calculation of U-shaped absorbing elements for chip-mounted attenuators for surface mounting, *Proceedings of Universities. Radio electronics*, 2009, no. 10, pp. 76–80 (in Russian).
9. **Lavrik V. I., Filchakova V. P., Yashin A. A.** Conformal mappings of physico-topological models, Kiev, Naukova dumka, 1990. 373 p. (in Russian).
10. **Jampurin N. P., Shirokov L. V., Sadkov V. D., Potekhina V. A.** Modern problems of the radio electronics from the standpoint of the theory of conformal displays. Arzamas, AGPI Publ., 2014. 209 p. (in Russian).
11. **Martyushov K. I., Zaitsev Yu. V., Tikhonov A. I.** Methods of calculating resistors, Moscow, Energiya, 1971. 208 p. (In Russian).
12. **Krylov V. I.** Approximate calculation of integrals. Moscow, Science Publ., 1967. 500 p. (in Russian).
13. **Tatur G. A.** Fundamentals of the theory of electrical circuits (reference): textbook. Moscow, Higher school, 1980. 271 p. (in Russian).
14. **Filchakov P. F.** Approximate methods of conformal maps: A reference manual, Kiev, Naukova dumka, 1964. 531 p. (in Russian).
15. **Gudkov A. G., Popov V. V.** Improving the reliability and quality of GIS and MIS microwave. Book 1. Moscow, Avtotest LLC, 2012. 212 p. (In Russian).
16. **Sedakov A. Y., Smolin V. K.** Thin-film elements in microelectronics: fundamentals of design and manufacturing. Moscow, Radiotekhnika, 2011, 168 p. (in Russian).
17. **Spirin V. G.** Thin-film microassemblies of high-density packaging: monograph, N. Novgorod, NSTU named after R. E. Alekseev, 2015, 296 p. (in Russian).
18. **Lugin A. N.** Design and technological bases of designing thin-film precision resistors, Penza, Information and Publishing Center of Penza State University, 2008, 288 p. (in Russian).
19. **Elcut** The website of the company "Tor". Available at: www.tor.ru. (in Russian).

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2, оф. 45. Телефон редакции журнала **8(499) 270-1652**. 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*.

Сдано в набор 11.04.2022. Подписано в печать 23.05.2022. Формат 60×88 1/8. Заказ МС322. 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

Рисунок к статье В. А. Беспалова, Е. Э. Гусева,
 Н. А. Дюжева, П. С. Иванина, М. А. Махибороды
 «ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ МИКРОСБОРКИ»

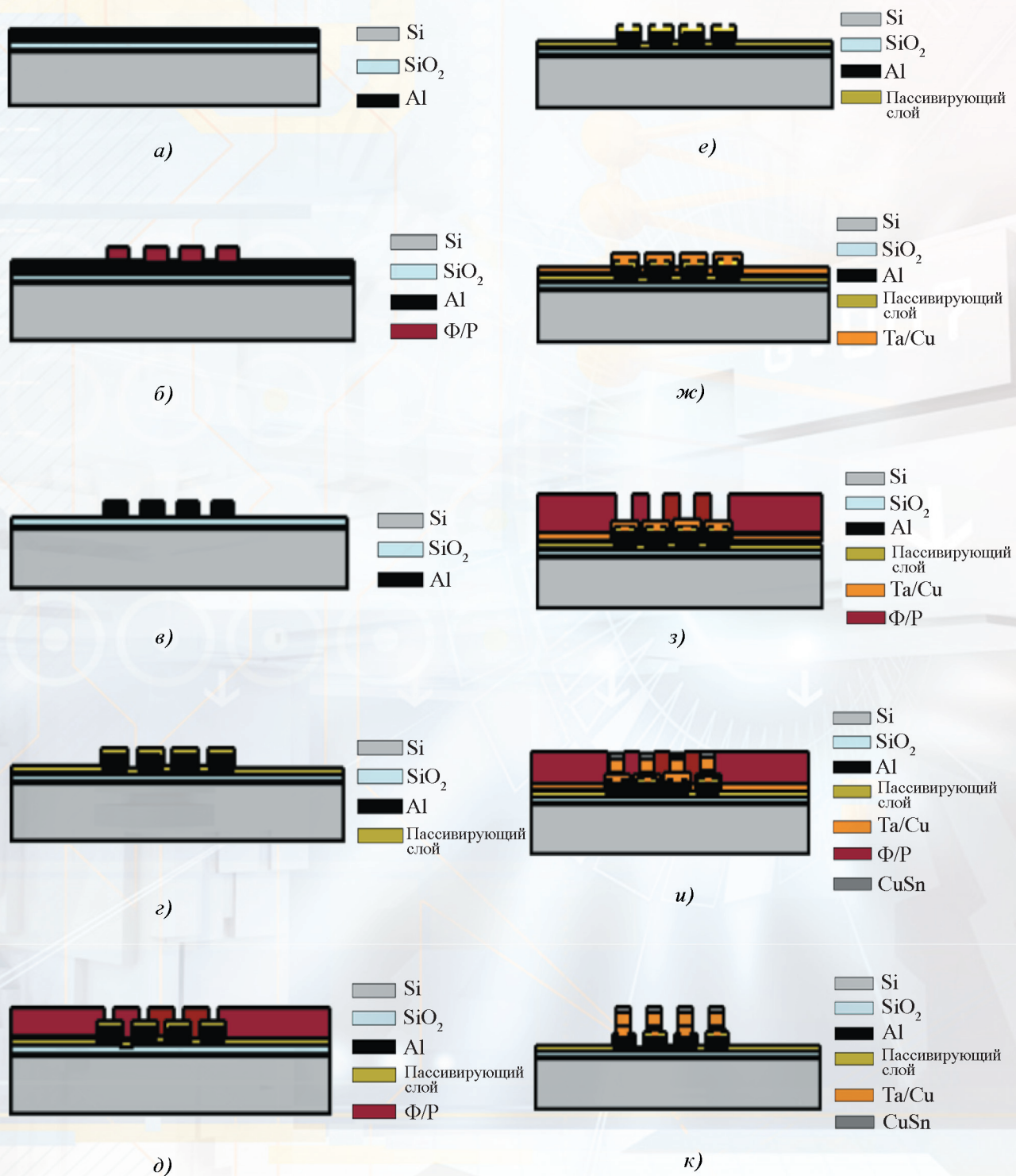


Рис. 7. Технологический процесс изготовления микровипр из припоя CuSn [17]

Рисунки к статье В. А. Беспалова, Е. Э. Гусева,
Н. А. Дюжева, П. С. Иванина, М. А. Махибороды
«ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ МИКРОСБОРКИ»

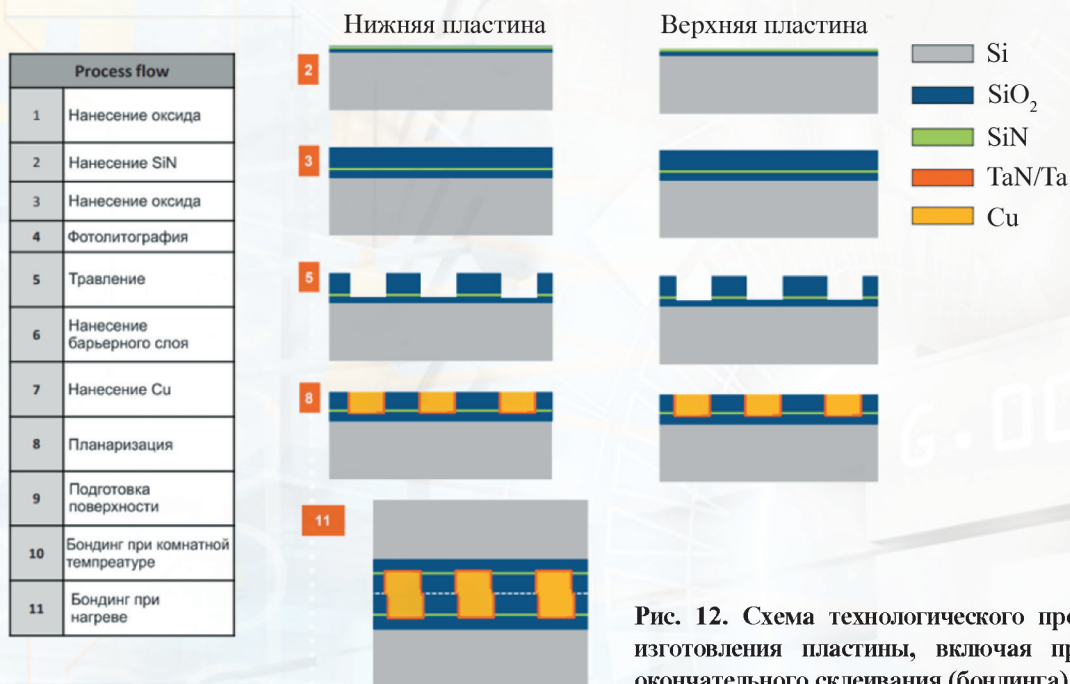


Рис. 12. Схема технологического процесса изготовления пластины, включая процесс окончательного склеивания (бондинга) [26]

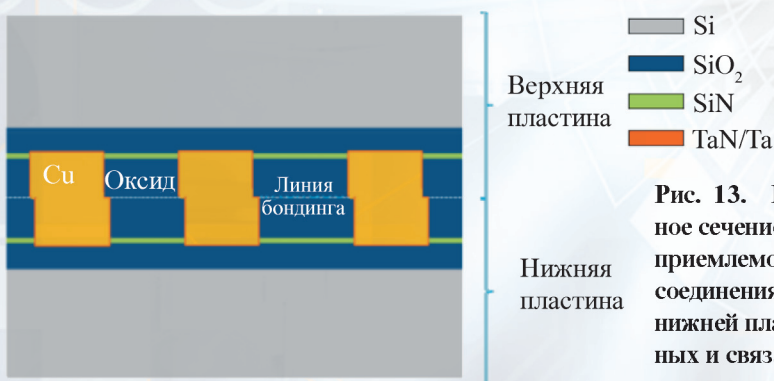


Рис. 13. Подробное схематическое поперечное сечение пары, имеющей небольшое и очень приемлемое несоответствие. Линия гибридного соединения, расположенная между верхней и нижней пластинами, состоит из оксидно-оксидных и связанных Cu-Cu частей [26]

Рисунок к статье Е. Е. Макаровой,
В. В. Амеличева, Д. В. Костюка, Д. В. Васильева,
Ю. В. Казакова, Е. П. Орлова
«ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕСТОВЫХ ЯЧЕЕК
ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ
МАГНИТОРЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ»

Рис. 3. Зависимости сопротивления СТМР
элемента от подаваемого тока в шины

