

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. № 1. 2022

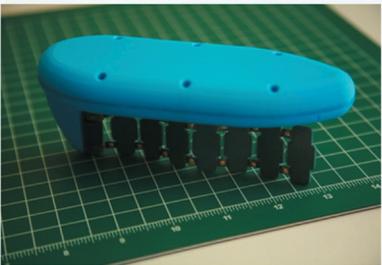


Таблица к статье И. К. Хмельницкого, В. В. Лучинина, А. Н. Горляка, В. М. Айвазяна, Н. И. Алексеева, А. П. Бройко, Ю. Д. Орехова, А. М. Карелина, Д. О. Тестова

«КОМПЛЕКС МИНИАТЮРНЫХ БИОНИЧЕСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

Таблица 1

Плавающие биороботы с движителями на основе ИПМК-актюаторов

Название	Изображение	Характеристики и особенности
«Угорь»		<ul style="list-style-type: none"> • Размеры – 55 × 50 × 62 мм; • материал корпуса – АБС-пластик; • движитель – 14 ИПМК-актюаторов и семь пассивных частей; • масса – 100 г; • тип движения – волнообразное, ВСА; • дистанционное управление – через Wi-Fi; • максимальная скорость – 12 мм/с на 0,4 Гц
«Скат»		<ul style="list-style-type: none"> • Размеры – 86 × 87 × 30 мм; • материал корпуса – АБС-пластик; • движитель – четыре ИПМК-актюатора и две пассивные части (в середине); два дополнительных пассивных «плавника» (в «хвосте»); • масса – 40 г; • тип движения – колебательное, МРА; • дистанционное управление – через Wi-Fi; • максимальная скорость – 35 мм/с на 0,5 Гц
«Скат-2»		<ul style="list-style-type: none"> • Размеры – 122 × 116 × 35 мм; • материал корпуса – фотополимерная смола; • движитель – 12 ИПМК-актюаторов и две пассивные части; • масса – 90 г; • тип движения – волнообразное, МРА; • дистанционное управление – через Wi-Fi; • максимальная скорость – 60 мм/с на 0,6 Гц

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 24. № 1 ✧ 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 научному направлению 02.00.00 химические науки и в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным направлениям: 01.04.00 физика, 05.27.00 электроника.

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук. Статьи имеют DOI

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

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

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

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

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

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

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

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

Редакционная коллегия:

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

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

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай)

Басаев А. С., к.ф.-м.н.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Дайнеко А. В., к.х.н.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Кузнецов В. И., д.т.н. (Нидерланды)

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

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

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония)

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

Сингх К., к.т.н. (Индия)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенко С. П., д.т.н.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н., доц.

Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Чугунова А. В. (науч. ред.)

Шетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Гусева О. С., Козлов Д. В., Корпухин А. С., Смирнов И. П., Андреев П. А. Применение фемтосекундного лазера при изготовлении кварцевых чувствительных элементов МЭМС-акселерометров 3

Оракова М. М., Мустафаев Г. А., Нагаплежева Р. Р. Исследование влияния чистоты поверхности кремния на ее смачиваемость 9

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Хмельницкий И. К., Лучинин В. В., Горляк А. Н., Айвазян В. М., Алексеев Н. И., Бройко А. П., Орехов Ю. Д., Карелин А. М., Тестов Д. О. Комплекс миниатюрных бионических робототехнических систем 13

Александров П. А., Фанченко С. С., Ефименко Е. В. Оценка влияния облучения тяжелыми заряженными частицами на работу МОП-транзистора 19

Кулиев М. В. Влияние состава гетероструктуры на долговременную стабильность СВЧ генератора 27

СИСТЕМЫ В КОРПУСЕ

Лисицкий А. П., Мальцев П. П., Матвеев О. С., Михалев А. О., Скрынский В. Р. Методы сборки "система-в-корпусе" в миллиметровом диапазоне длин волн: структуры и материалы. Обзор 30

Указатель статей, опубликованных в журнале "Нано- и микросистемная техника" в 2021 г. 51

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. 1

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

Editorial board:

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

Editorial staff:

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

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

CONTENTS

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Guseva O. S., Kozlov D. V., Korpukhin A. S., Smirnov I. P., Andreev P. A. Application of a Femtosecond Laser in the Fabrication of fused Silica Sensing Elements for MEMS Accelerometers 3

Orakova M. M., Mustafaev G. A., Nagaplegeva R. R. Investigation of the Influence of the Purity of the Silicon Surface on its Wettability 9

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Khmel'nitskiy I. K., Luchinin V. V., Gorlyak A. N., Aivazyan V. M., Alekseyev N. I., Broyko A. P., Orekhov Yu. D., Karelin A. M., Testov D. O. Complex of Miniature Bionic Robotic Systems 13

Aleksandrov P. A., Fanchenko S. S., Efimenko E. V. Estimation of the influence of irradiation to heavy charged particles on the operation of a MOSFET 19

Kuliev M. V. Influence of the Heterostructure Composition on the Long-Term Stability of a Microwave Oscillator 27

SYSTEM-IN-PACKAGE

Lisitsky A. P., Maltsev P. P., Matveenko O. S., Mikhalev A. O., Skrin'skiy V. R. Assembly Techniques of "System-in-Package" in Millimeter Wavelength Range: Structures and Materials. Review 30

Index of articles published in the journal "Nano- and Microsystems Technology" in 2021 51

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 531.768

DOI: 10.17587/nmst.24.3-8

О. С. Гусева, инженер-исследователь 3 кат., e-mail: shestakova.kd@spacecorp.ru,
Д. В. Козлов, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., e-mail: kozlov.dv@spacecorp.ru,
А. С. Корпухин, канд. техн. наук, зам. начальника отдела, e-mail: korpukhin.as@spacecorp.ru,
И. П. Смирнов, начальник сектора, e-mail: smirnov.ip@spacecorp.ru,
АО "Российские космические системы", г. Москва,
П. А. Андреев, инженер-технолог 2 кат., e-mail: pivk1331@gmail.com,
Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-производственное объединение
"Техномаш", г. Москва.

ПРИМЕНЕНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КВАРЦЕВЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Поступила в редакцию 16.11.2021

Известен групповой метод изготовления кварцевых чувствительных элементов МЭМС-акселерометров типа Q-flex, основанный на последовательном жидкостном и плазмохимическом (во фторсодержащей плазме) травлении. В целях уменьшения дефектности конечных изделий, трудозатрат на их изготовление и получения в сечении чувствительного элемента прямоугольного профиля травления сквозных отверстий разработана альтернативная технология формирования отверстий, заключающаяся в предварительной обработке кварцевого стекла лазерным излучением с ультракороткой длительностью импульса (порядка сотен фемтосекунд) на всю толщину подложки и последующем жидкостном травлении отверстий. В ходе проведенных исследований выявлен эффект локального увеличения скорости травления облученных участков кварцевого стекла при жидкостном травлении в плавиковой кислоте или щелочном растворе. Проанализировано влияние концентрации травящего раствора на изменение скорости травления и шероховатости кварца. Полученная технология является универсальной и может быть применена для высокоточной объемной обработки изделий, формируемых из кварцевого стекла толщиной до 4 мм.

Ключевые слова: акселерометр, кварц, технология, упругий элемент, фемтосекундный лазер

Введение

Методы формирования чувствительных элементов из кварцевого стекла для маятниковых узлов МЭМС-акселерометров, основанные на жидкостном и плазменном методах травления, не позволяют технологично получить в сечении прямоугольный профиль сквозных отверстий [1]. Использование фемтосекундного лазерного излучения за счет сверхкороткой длительности импульса позволяет достичь рекордных значений интенсивности излучения, когда перво-

степенную роль начинают играть нелинейные процессы, вследствие чего изменяется характер взаимодействия и поглощения энергии лазерных импульсов веществом. Взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов с веществом объясняется двухтемпературной моделью [2]. Высокая пиковая мощность одиночного лазерного импульса, благодаря малой длительности, приводит к возбуждению электронной подсистемы облучаемого материала. Время термализации электронов не превышает 100 фс, а передача

энергии от электронной подсистемы к фоновой подсистеме составляет пикосекунды. Следовательно, только малая часть энергии лазерного импульса преобразуется в тепло. Таким образом, если длительность лазерного импульса меньше длительности электрон-фононного взаимодействия, можно изменить зависимость поглощения излучения веществом от длины волны. Например, исходно прозрачный плавленный кварц на длине волны около 1 мкм при фемтосекундной длительности импульсов может существенно поглощать энергию излучения в фокальной области.

Фемтосекундное лазерное облучение плавленного кварца влияет, как минимум, на две характеристики материала — показатель преломления и скорость жидкостного химического травления [3]. Механизм, ответственный за увеличение показателя преломления и скорости травления, на данный момент до конца не изучен. Неизвестно, связан ли он с лазерно-индуцированным изменением угла связи Si—O—Si в кислород-кремниевых тетраэдрах, с повышением уровня внутренних напряжений, либо наличием пустот или микротрещин. Кроме того, способность получать произвольные формы до сих пор ограничивалась формой лазерного луча [4].

Таким образом, подбирая длину волны, дозу облучения, поляризацию, частоту импульсов и фокусное расстояние, можно модифицировать химические свойства облученных участков на всю толщину заготовки без оплавления с неболь-

шим эффектом абляции и, используя методы жидкостного химического травления, получать отверстия с прямоугольным профилем в подложках из плавленного кварца за счет увеличения скорости травления обработанной лазером области.

Целью работы являлась разработка технологии, позволяющей на предварительно обработанных фемтосекундным лазером образцах получать кварцевые чувствительные элементы маятниковых узлов акселерометров типа Q-flex с требуемым уровнем точности.

Описание эксперимента

Данную работу проводили с использованием экспериментальной установки, структурная схема которой представлена на рис. 1. Ее базовым элементом является фемтосекундная лазерная система типа Phagos, на выходе которой генерируется оптическое излучение со следующими характеристиками:

- длина волны — 1030 нм (первая гармоника);
- частота следования импульсов — 100 кГц;
- длительность импульсов — около 300 фс;
- энергия импульсов — 0,9 мкДж;
- поляризация излучения — линейная горизонтальная.

Передача лазерного излучения от источника до рабочей зоны осуществляется с помощью двух зеркал и фокусируется объективом с числовой апертурой 0,25. Также в оптический тракт

дополнительно установлена четвертьволновая поляризационная пластина для изменения поляризации излучения источника с линейной на круговую, поскольку известно влияние направления вектора поляризации на скорость травления модифицированного кварцевого стекла в растворе плавиковой кислоты [5].

Перемещение заготовки в процессе обработки осуществляется автоматически с помощью числового программного управления (ЧПУ) согласно написанной программе на языке G-кодов.

Процесс обработки на данной установке представляет собой послойное экспонирование необходимого контура с перемещением фокуса на 20 мкм от ниж-

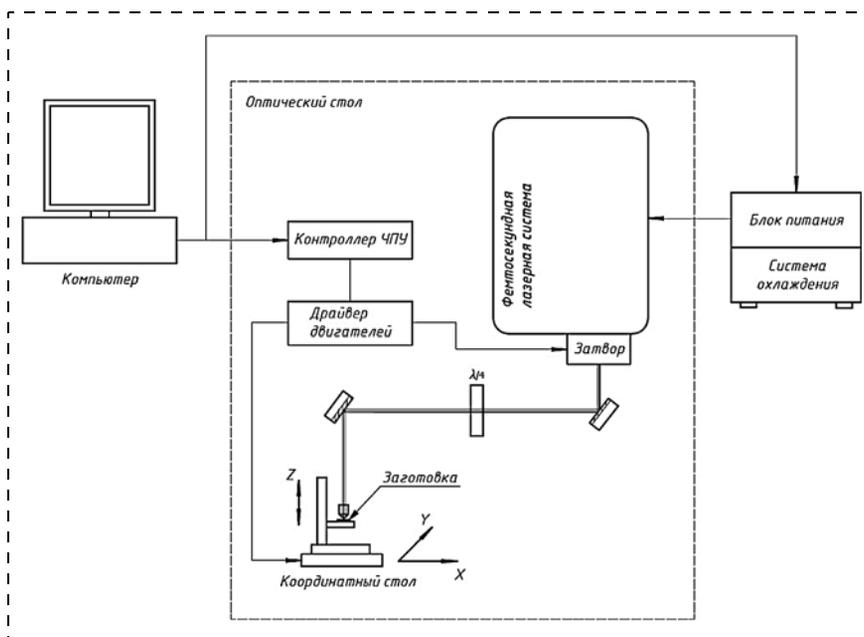


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки

ней поверхности к верхней и перекрытием слоев на всей глубине заготовки [6].

Для экспериментов использовали кварцевые пластины 60×48 мм толщиной 1 мм с предварительно сформированной топологией, полученной после обработки кварцевой заготовки с помощью фемтосекундной лазерной системы на всю толщину подложки по периметру формируемых отверстий. При воздействии лазерного импульса происходит модификация структуры кварцевого стекла и частичная приповерхностная абляция (а именно, удаление вещества с поверхности образца) [7], пример которой показан на рис. 2.

Облучение заготовки лазерным излучением из коротких импульсов и последующее травление в плавиковой кислоте является известным методом создания топологии при микрообработке кварцевого стекла и других материалов [2]. В работе проведено травление предварительно обработанных фемтосекундным лазерным излучением кварцевых образцов в плавиковой кислоте различной концентрации (49 и 4,9 %) при перемешивании раствора со скоростью перемешивания 0,5 об/с. После каждой итерации травления проводили измерение толщины и шероховатости кварцевого стекла в об-

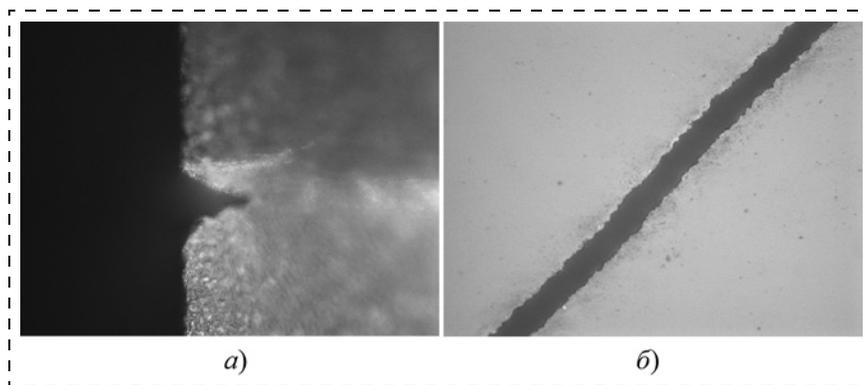


Рис. 2. Абляция кварцевого стекла после обработки фемтосекундным лазером: а — вид в разрезе; б — вид сверху

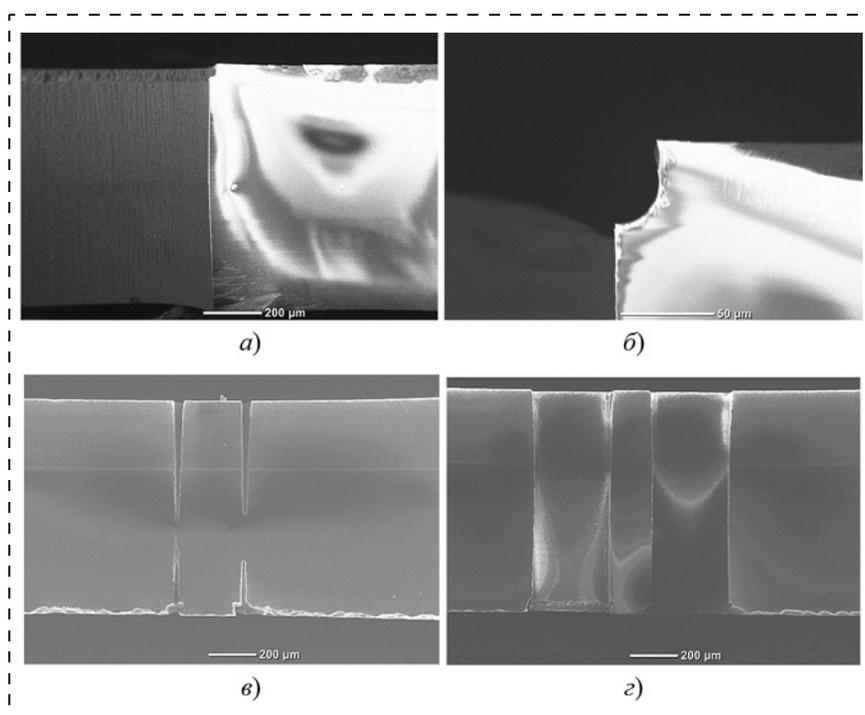


Рис. 3. Изображения с электронного микроскопа кварцевого стекла (предварительно обработанного фемтосекундным лазерным импульсом) в процессе травления в 4,9 %-ном водном растворе плавиковой кислоты:

а — профиль боковой стенки в кварце после сквозного травления (в разрезе); б — увеличенное изображение участка с абляцией после сквозного травления кварца; в, г — этапы процесса травления кварца

Результаты экспериментальных исследований процесса травления кварца, предварительно обработанного фемтосекундным лазерным излучением

Травитель, концентрация	Скорость травления необлученной поверхности кварца, мкм/мин	Селективность травления	Шероховатость на необлученной поверхности после сквозного травления ($t = 1000$ мкм), нм
HF 49 %	2,2	20/1	~150
HF 4,9 %	0,092	20/1	~520

ласти необлученного кварца. Конечной точкой травления считалось сквозное вскрытие отверстий по рисунку топологии. Параметры конечной шероховатости необлученных участков и селективность травления необлученных участков к облученным для указанных концентраций показаны в таблице.

Ограничивающий фактор данной технологии заключается в наличии дефекта, который появляется в результате лазерной абляции и остается после жидкостного травления (рис. 3, а). Размер

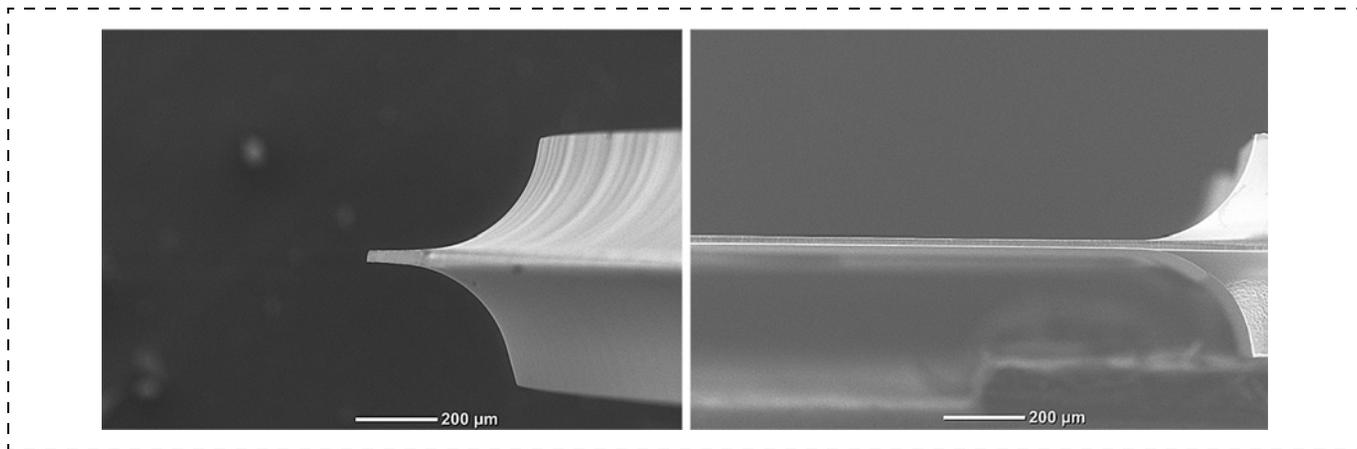


Рис. 4. Изображения с электронного микроскопа кварцевого стекла после сквозного травления (известная технология)

зоны абляции составляет около 12 мкм шириной и 30 мкм глубиной. Рассматриваемый дефект представляет собой нелинейно растравленную в стороны область (рис. 3, б), расположенную в зоне абляции, что негативно сказывается на равномерности травления кварца со стороны зоны абляции (рис. 3, в). По результатам проведенных измерений также определено, что уход размеров при жидкостном травлении по контуру топологии, сформированному фемтосекундным лазером, составил около 40 мкм на боковую сторону при глубине травления 500 мкм с каждой из сторон. Этапы процесса травления кварца показаны на рис. 3: вначале происходит постепенное травление облученной зоны вглубь кварца с двух сторон (рис. 3, в), после чего высвобождаются области с замкнутым контуром топологии, и образуются сквозные отверстия (рис. 3, г).

Оптимизация технологии изготовления кварцевого маятникового узла

Известная технология группового производства кварцевых маятниковых узлов [1] основана на процессах жидкостного и плазменного травления кварца. Все процессы травления проводят через селективную маску, сформированную методом фотолитографии и жидкостным химическим травлением. Формирование структуры маятникового узла проводят с использованием двустороннего жидкостного химического травления кварца в растворе плавиковой кислоты для получения мембраны заданной толщины и анизотропного реактивного ионного травления для получения сквозных отверстий [8]. Недостатком метода является нелинейный профиль боковой грани сквозных отверстий при травле-

нии (рис. 4), отрицательно влияющий на механические характеристики конечного изделия.

Для решения данной проблемы на основе проведенных исследований разработана оптимизированная технология изготовления чувствительного элемента маятникового узла компенсационного акселерометра типа Q-flex на основе кварцевого стекла, облученного фемтосекундным лазерным излучением. Этапы технологического процесса изображены на рис. 5.

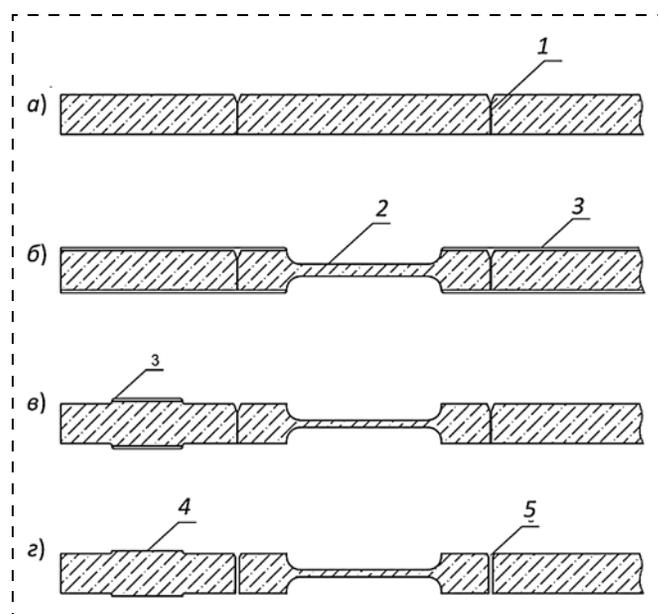


Рис. 5. Этапы технологического процесса изготовления кварцевых чувствительных элементов маятниковых узлов акселерометров типа Q-flex:

а — предварительно обработанная лазером пластина кварца; б, в — формирование маски и глубинное травление кварца; г — финишное травление сквозных отверстий в кварце; 1 — кварцевая заготовка, облученная фемтосекундным лазером; 2 — упругая перемычка; 3 — защитная маска; 4 — платики; 5 — сквозные отверстия

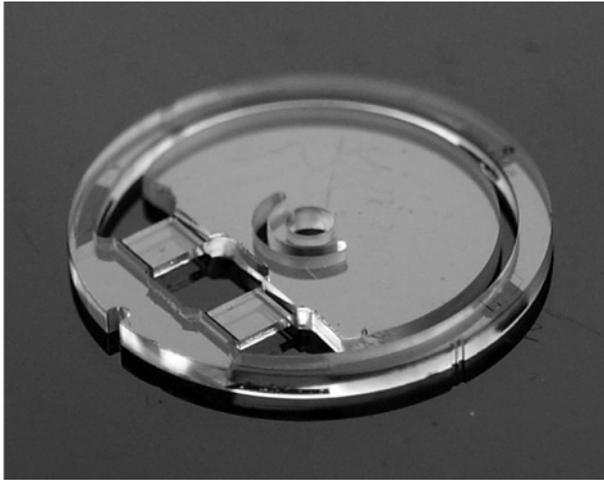


Рис. 6. Образец предварительно обработанного лазерным излучением кварцевого чувствительного элемента маятникового узла акселерометров типа Q-flex

На полученные образцы (рис. 5, а) наносят селективную маску 3 к травлению в плавиковой кислоте и проводят глубинное травление в плавиковой кислоте с концентрацией 49 % с обеих сторон в целях формирования упругой перемычки 2 (рис. 5, б). На следующем этапе формируются платици 4, высота которых задает расстояние между подвижными электродами на лопасти маятникового узла и неподвижными электродами, фиксирующими маятниковый узел в корпусе прибора (рис. 5, в). На этом этапе происходит частичное вытравливание облученного кварца, заключительный этап травления (рис. 5, г) проводят в плавиковой кислоте концентрации 4,9 % со скоростью 0,092 мкм/мин.

Одной из обнаруженных проблем при реализации данной технологии является боковой растрав материала кварца при травлении в плавиковой кислоте. В результате этого, если зона травления на этапе предварительного глубинного травления попадает на область, облученную фемтосекундным лазером, происходит неконтролируемое травление по контуру лазерной обработки. Таким образом, часть элементов конструкции может не соответствовать необходимой геометрии, что резко снижает выход годных образцов и приводит к непредсказуемому изменению трехмерной структуры образца после травления. Для решения данной проблемы предложено скорректировать топологический рисунок при обработке фемтосекундным лазером таким образом, чтобы в месте пересечения областей глубинного травления и областей облучения ла-

зером присутствовал разрыв, больший чем значение растрав на сторону при предварительном глубинном травлении. Полученный по описанной выше технологии образец кварцевого чувствительного элемента маятникового узла представлен на рис. 6.

Заключение

В работе на основе известного метода изготовления кварцевых маятниковых узлов с использованием жидкостного и плазменного травления разработана оптимизированная технология с использованием обработки фемтосекундным лазерным излучением заготовок кварца. Данное решение позволило снизить трудозатраты на производство за счет сокращения числа операций и получить образцы маятниковых узлов с высокоточным прямоугольным профилем боковых поверхностей кварца после его травления.

Список литературы

1. Патент 2656109 С1 Российская Федерация. № 2017109870. Способ изготовления чувствительного элемента акселерометра / Козлов Д. В., Смирнов И. П., Корпунин А. С., Запетляев В. М., Исакова Г. А. заявл. 24.03.2017; опубл. 31.05.2018. Бюл № 16. 12 с.
2. Либенсон М. Н., Яковлев Е. Б., Шандыбина Г. Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть II. Лазерный нагрев и разрушение материалов. Учеб. пособие. Под общей ред. В. П. Вейко. СПб: НИУ ИТМО, 2014. 181 с.
3. Strelsoy A., Borrelli N. Study of femtosecond-laser-written waveguides in glasses // Journal of the optical society of America B. 2002. Vol. 19. Issue 10. P. 2496—2504.
4. Marcinkevicius A., Juodkazis S., Watanabe M., Miwa M., Matsuo S., Misawa H., Nishii J. Femtosecond Laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica // Optics letters. 2001. Vol. 26. Issue 5. P. 277—279.
5. Андреев П. А. Определение влияния ориентации модифицированных структур на эффективность процесса направленного травления кварцевого стекла // 21-я молодежная международная научно-техническая конференция "Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы—2019". Москва, 17 апреля 2019 г., МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. С. 130—133.
6. Kuznetsov V. S., Maiorov D. V., Andreev P. A. Fabrication of tuning fork gyroscope resonator using directed chemical etching of fused silica // Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering. 2019. N. 4. P. 32—44. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-4-32-44
7. Bellouard Y., Said A., Dugan M., Bado P. Fabrication of high-aspect ratio, micro-fluidic channels and tunnels using femtosecond laser pulses and chemical etching // Optics Express. 2004. Vol. 12. Issue 10. P. 2120—2129.
8. Харламов М. С., Гусева О. С., Коновалов С. Ф. Особенности применения реактивного ионного травления кварца при изготовлении маятниковых узлов Q-flex акселерометров // Микроэлектроника. 2020. Т. 49, № 2. С. 1—12.

O. S. Guseva, Research Engineer 3rd categories, shestakova.kd@spacecorp.ru,
D. V. Kozlov, Ph. D., Lead Researcher, kozlov.dv@spacecorp.ru,
A. S. Korpukhin, Ph. D., Deputy Head of Department, korpukhin.as@spacecorp.ru,
I. P. Smirnov, Head of Sector, smirnov.ip@spacecorp.ru,
Joint-stock company "Russian Space Systems", Moscow, 111024, Russian Federation,
P. A. Andreev, Process Engineer 2nd categories, pivk1331@gmail.com,
Federal State Unitary Enterprise "NPO "Tekhnomash", Moscow, 127018, Russian Federation

Corresponding author:

Korpukhin Andrey S., Ph. D., Deputy Head of Department, Joint-stock company "Russian Space Systems"; Moscow,
e-mail: korpukhin.as@spacecorp.ru

Application of a Femtosecond Laser in the Fabrication fused Silica Sensing Elements for MEMS Accelerometers

Received on August 19, 2021

Accepted on September 23, 2021

A group method of manufacturing quartz sensing elements of MEMS Q-flex type accelerometers is known, which is based on sequential liquid and plasma chemical etching in fluorinated plasma. In order to reduce the defects of the final products, labor costs for their manufacture and to obtain a rectangular etching profile of through holes in the section of the sensing element, an alternative technology for forming holes has been developed. The technology is thus the laser radiation pretreatment of fused silica glass with ultrashort pulse duration (about hundreds of femtoseconds) for the entire thickness of the substrate and subsequent liquid etching holes. The conducted studies revealed a local increase in the etching rate of irradiated section of fused silica glass during liquid etching with hydrofluoric acid or alkaline solution. The influence of the etching solution concentration on the change in the etching rate and the roughness of quartz is analyzed. The technology is universal and it can be used for high-precision volumetric processing of product formed from fused silica glass up to 4 mm thick.

Keywords: *accelerometer, fused silica, technology, elastic element, femtosecond laser*

For citation:

Guseva O. S., Kozlov D. V., Korpukhin A. S., Smirnov I. P., Andreev P. A. Application of a Femtosecond Laser in the Fabrication fused Silica Sensing Elements for MEMS Accelerometers, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 3–8.

DOI: 10.17587/nmst.24.3-8

References

1. **Patent** 2656109 C1 Russian Federation. № 2017109870. Способ изготовления чувствительного элемента акселерометра. Kozlov D. V., Smirnov I. P., Korpukhin A. S., Zapetlyayev V. M., Isakova G. A., заявл. 24.03.2017; опubl. 31.05.2018, Бжл. № 16. 12 p.
2. **Libenson M. N., Jakovlev E. B., Shandybina G. D.** Vзаимodejstvie lazernogo izlucheniya s veshhestvom (silovaya optika). Part II. Lazernyj nagrev I razrushenie materialov. Uchebnoe posobie. Pod obshhej redakciej V. P. Vejko. Saint-Petersburg, NIU ITMO, 2014, 181p. (in Russian).
3. **Strelsoy A., Borrelli N.** Study of femtosecond-laser-written waveguides in glasses, *Journal of the optical society of America B.*, 2002, vol. 19, issue 10, pp. 2496–2504.
4. **Marcinkevicius A., Juodkazis S., Watanabe M., Miwa M., Matsuo S., Misawa H., Nishii J.** Femtosecond Laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica, *Optics letters*, 2001, vol. 26, issue 5, pp. 277–279.
5. **Andreev P. A.** Opredelenie vlijaniya orientacii modificirovannyh struktur na jeffektivnost' processa napravlennoogo travleniya kvarcevoego stekla, *21-aja Molodezhnaja mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija "Naukojomkie tehnologii i intellektual'nye sistemy — 2019"*, Moscow, 17 April 2019, BMSTU, 2019, pp. 130–133 (in Russian).
6. **Kuznetsov V. S., Maierov D. V., Andreev P. A.** Fabrication of tuning fork gyroscope resonator using directed chemical etching of fused silica, *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2019, no. 4, pp. 32–44. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-4-32-44.
7. **Bellouard Y., Said A., Dugan M., Bado P.** Fabrication of high-aspect ratio, micro-fluidic channels and tunnels using femtosecond laser pulses and chemical etching, *Optics Express*, 2004, vol. 12, issue 10, pp. 2120–2129.
8. **Harlamov M. S., Guseva O. S., Kononov S. F.** Osobennosti primeneniya reaktivnogo ionnogo travleniya kvarca pri izgotovlenii majatnikovyh uzlov Q-Flex akcelorometrov, *Mikrojelektronika*, 2020, vol. 49, no. 2, pp. 1–12 (in Russian).

М. М. Оракова, ст. преподаватель, e-mail: uyanaeva1984@rambler.ru,
Г. А. Мустафаев, д-р техн. наук, проф., **Р. Р. Нагаплежева**, ст. преподаватель,
 Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, г. Нальчик

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ НА ЕЕ СМАЧИВАЕМОСТЬ

Поступила в редакцию 04.07.2021

Исследовано влияние способа химической обработки пластин КДБ (111), КДБ (100) и КЭМ (100) и малых доз NaCl на угол стекания воды. Установлено, что малые дозы NaCl незначительно влияют на смачиваемость поверхности КДБ (111), КДБ (100) и КЭМ (100). Также установлено, что пластины, обработанные этанолом до травления в HF , лучше смачиваются водой.

Ключевые слова: угол стекания, смачиваемость, оже-спектры, морфология, КДБ (100), КДБ (111), КЭМ (100), АСМ-изображение, поверхностное натяжение

Введение

В микроэлектронном производстве и смежных областях основой для конечного продукта являются полупроводниковые пластины из различных материалов. Большая часть микросхем производится на основе пластин монокристаллического кремния [1]. Кремний как исследуемый материал выбран благодаря своему широкому использованию в нанoeлектронике, спинтронике. Также кремний находит применение в качестве подложек для эпитаксиального роста тонких магнитных пленок, магнитных мультислоев и полупроводниковых сверхрешеток [2].

Значение процессов, происходящих на поверхности исходных подложек, возрастает с уменьшением их размеров. Наилучшим путем для получения информации о фундаментальных свойствах поверхности является исследование чистых поверхностей [3–7]. На практике можно лишь в той или иной степени приблизиться к идеально чистой поверхности. Чистой поверхностью является поверхность материала, химический состав которой однороден со вторым внутренним слоем атомов и которая покрыта не более одной сотой доли монослоя чужеродных атомов [8–16]. Вот почему так важно исследование влияния обработки поверхности на поверхностные свойства кремния.

Таким образом, целью данной работы являлось исследование зависимости углов стекания воды с поверхности кремния от режимов их подготовки. В качестве образцов были использова-

ны пластины монокристаллического кремния дырочной проводимости КДБ-10 с ориентацией поверхности (111) и (100), и пластины электронной проводимости КЭМ с ориентацией поверхности (100). В качестве смачивающей жидкости использовали дистиллированную воду [17].

Методика проведения эксперимента

Травление кремния в растворах HF эффективно удаляет любой оксидный слой и создает устойчивую, завершённую водородом поверхность [18]. Поэтому для очистки поверхности от загрязнений и естественного оксида использовали раствор $\text{HF}:\text{H}_2\text{O} = 1:10$. Перед травлением в таком растворе кремниевые пластины проходили различные варианты обезжиривания поверхности (см. таблицу). Затем пластины промывали в последовательной трехкаскадной ванне с проточной дистиллированной водой с последующей сушкой при $300\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 мин.

Для оценки эффективности очистки и состояния исследуемых твердых поверхностей используют различные методы [19]. Простым и до-

Номер образца	Обезжиривание	Время обработки, мин
1	Нет	—
2	Мыльный раствор	1
3	Этанол (спирт медицинский 95 %, пр-во фирмы "Феррейн")	1

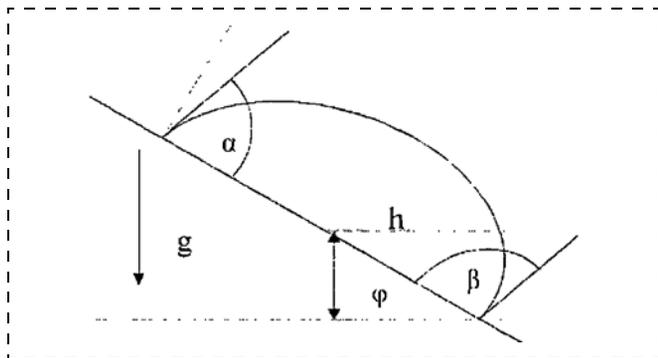


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

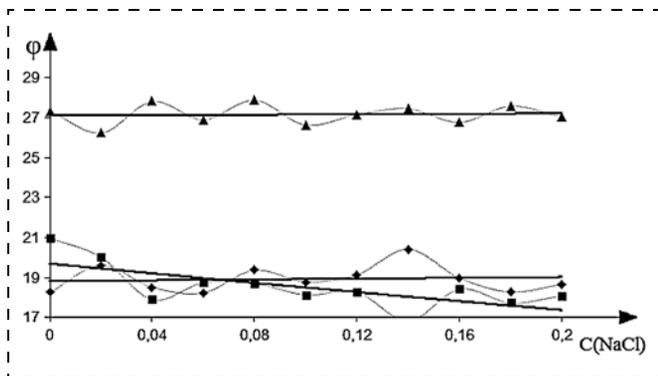


Рис. 2. Угол смачивания капли с поверхности пластины КДБ (100) в зависимости от концентрации NaCl в воде при различных режимах обработки пластин кремния (◆ — по схеме 1; ■ — по схеме 2; ▲ — по схеме 3)

ступным методом обнаружения загрязнений является проверка на смачиваемость [20].

Для оценки смачивания твердой поверхности жидкостью мы измеряли угол смачивания капли θ (рис. 1).

Угол смачивания рассчитывали, как среднее из не менее восьми значений. Среднее квадратичное отклонение при этом составило $\pm 2^\circ$.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2, 3 и 4 приведены зависимости углов смачивания капли θ от концентрации NaCl в воде при различных способах обработки пластин КДБ (100), КДБ (111) и КЭМ (100) соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о влиянии способа подготовки поверхности пластины на угол смачивания капли воды. Видно, что пластины, для которых в процедуре подготовки используется этанол, лучше смачиваются водой. Этот результат также подтверждается оже-анализом — пластины, обработанные спиртом, со-

держат меньшее количество углеродсодержащих примесей (рис. 5).

Этот вывод также подтверждается топограммами, полученными на атомно-силовом микроскопе (рис. 6).

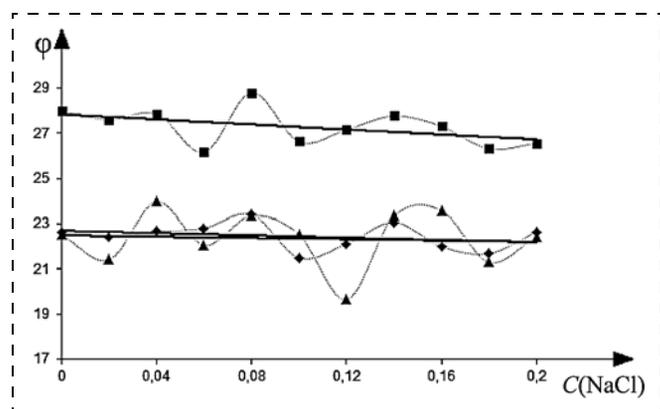


Рис. 3. Угол смачивания капли с поверхности пластины КДБ (111) в зависимости от концентрации NaCl в воде при различных режимах обработки пластин кремния (◆ — по схеме 1; ▲ — по схеме 2; ■ — по схеме 3)

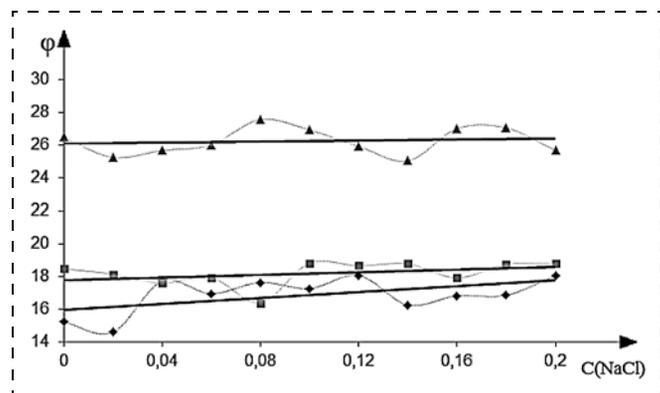


Рис. 4. Угол смачивания капли с поверхности пластины КЭМ (100) в зависимости от концентрации NaCl в воде при различных режимах обработки пластин кремния (◆ — по схеме 1; ■ — по схеме 2; ▲ — по схеме 3)

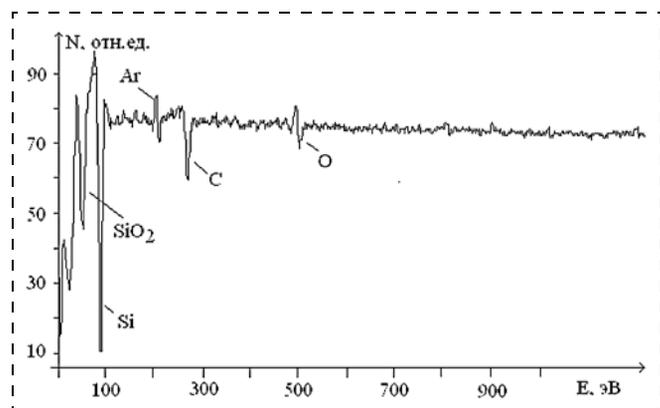


Рис. 5. Оже-спектр КДБ (100) после химической обработки, выполненной по первому варианту

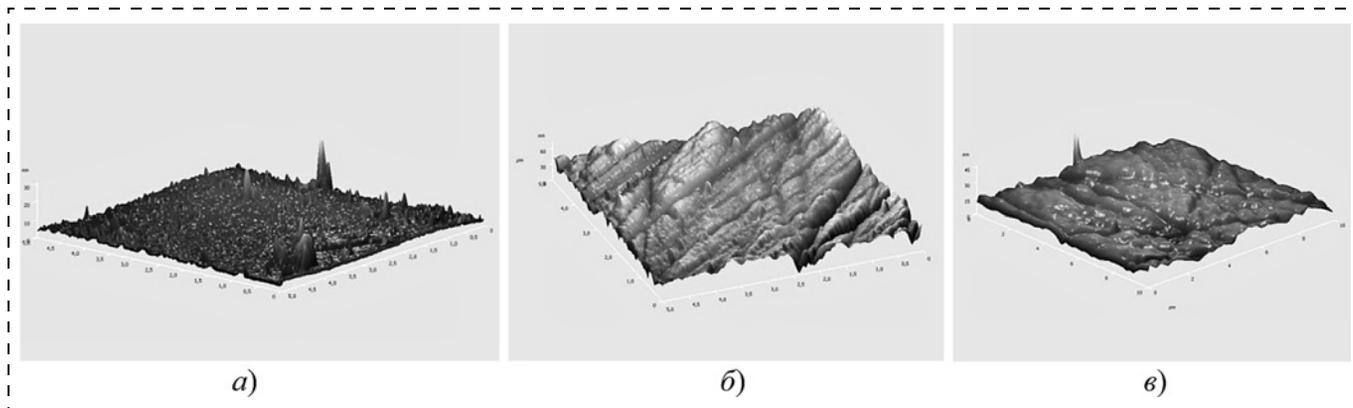


Рис. 6. Топографии поверхности КДБ (111) после различных видов обработки:
а — по схеме 1; *б* — по схеме 2; *в* — по схеме 3

Также в работе исследовано влияние малых добавок NaCl (0...0,2 г/л с шагом 0,02) в дистиллированной воде на смачиваемость кремниевой поверхности. В исследуемом диапазоне концентраций NaCl угол стекания изменялся незначительно. Это можно объяснить тем, что водный раствор хлорида натрия диссоциирован на свободные сольватированные ионы Na^+ (aq) и Cl^- (aq), но эти ионы фактически не реагируют с водой. Значение pH раствора остается таким же, как pH абсолютно чистой воды. Также же-анализ показал полное отсутствие NaCl на поверхности исследованных пластин (см. рис. 5), что исключает адсорбцию NaCl на поверхность кремния.

Список литературы

1. <https://ostec-materials.ru/materials/dlya-proizvodstva-mi/plastiny-dlya-kristalnogo-proi.php>
2. **Соловьева Е. С., Паршин А. С.** Спектроскопия характеристических потерь энергии электронов кремниевых пластин в процессе термической очистки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. Т. 1. № 9, С. 142–143.
3. **Ковалевский А. А., Строгова А. С., Комар О. М.** Исследование влияния чистоты поверхности подложек на процесс образования и трансформацию нанокластеров кремний-германий // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 3. С. 149–158.
4. **Никифоров В. В., Ульянов В. В., Пчеляков О. П.** и др. Рост и структура наноостровков Ge на атомарно чистой поверхности окиси Si // ФТТ. 2004. Т. 46, № 1. С. 80–82.
5. **Востоков Н. В., Дроздов Ю. Н., Красильник З. Ф.** и др. Влияние предосаждения $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ слоя на рост SiGe/Si самоформирующихся островков // ФТТ. 2005. Т. 47, № 1. С. 29–32.
6. **Яремко А. М., Валах М. Я., Джиган В. Н.** и др. Взаимосвязь минимумов поверхностной энергии самоиндуцированных наноостровков SiGe и их формы // Физика и техника полупроводников. 2006. Т. 40, Вып. 4. С. 391–396.
7. **Kovalevskii A. A.** Suppression of Recrystallization Processes in Polycrystalline Silicon Films by Thin Layers of Amor-

phous Silicon // Russian Microelectronics. 1998. V. 27, N. 1. P. 16–21.

8. **Samoilov A. V., Du Bois D., Comita P. B., Carlson D.** Delicated Pre-clean Reduces Epi's Thermal Budget // Semiconductor International. 2000. N. 11. P. 73.

9. **Dong-Won Kim, Sungbo Hwang, Eolgar T. F., Sanjoy Banerjee.** Characterization of SiGe Quantum Dots on SiO_2 and HfO_2 Grown by Rapid Thermal Chemical Preposition for Nanoelectronic Devider // Journal of Electrochemical Society. 2003. V. 150, N. 4. P. 240–243.

10. **Kovalevskii A., Strogova A., Strogova N., Babushkina N.** Correlation between the size of three-dimensional nanoclusters and C-V characteristics // Proceedings of International conference nanomeeting. 2013. P. 629–631.

11. **Kern W.** Radiochemical study of semiconductor surface contamination. I. Adsorption reagent compounds // RCA review. 1970. V. 31. P. 207–233.

12. **Kovalevskii A., Strogova A., Strogova N., Babushkina N.** Investigation of Electrical Properties of MOS Structures with Silicon Nitride Films Doped with Rare Earth Elements // Russian Microelectronics. 2014. V. 43, N. 4. P. 246–251.

13. **Watanabe S., Nakayama N., Ito T.** Homogeneous hydrogen-terminated Si(111) surface formed using aqueous HF solution and water // Applied Physics Letters, —September 16, 1991. V. 59. Issue 12. P. 1458–1460.

14. **Braun E. A.** Photoresist stripping faces low-k challenges // Semiconductor international. — 1999. V. 22. N. 12. P. 64–74.

15. **Kern W., Puotinen D. A.** Cleaning solutions based on hydrogen peroxide for use in silicon semiconductor technology // RCA review. 1970. V. 31. P. 187–206.

16. **Полтавцев Ю. Г.** Технология обработки поверхностей в микроэлектронике. Киев: Техника, 1990. 205 с.

17. **Калинина Н. В., Соколов С. М., Ашхотов О. Г., Чагай Е. О.** Подготовка воды и методика измерения краевого угла смачивания поверхности свинцовосиликатного стекла 6Ba4 // Вестник КБГУ. Серия Физические науки. 2005. Вып. 10. С. 35–37.

18. **Воронов А. Н.** Коллоидная химия. М.: Высшая школа, 1987. 357 с.

19. **Моро У.** Микролитография. Ч. 1. Пер.с. англ. М.: Мир, 1990. 351 с.

20. **Коробцов В. В., Фидаини О. Н., Шапоренко А. П., Балашев В. В.** Влияние способа химической обработки на смачиваемость поверхности Si (111) // Журнал технической физики. 1996. Т. 66, № 12. С. 57–59.

M. M. Orakova, Lecturer, uyanaeva1984@rambler.ru, **G. A. Mustafaev**, D. Sc., Professor,
R. R. Nagaplejeva, Lecturer,
Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov, Nalchik, Russian Federation

Corresponding author:

Orakova Mariam M., Lecturer, Kabardino — Balkarian State University named after H. M. Berbekov, Nalchik
E-mail: uyanaeva1984@rambler.ru

Investigation of the Influence of the Purity of the Silicon Surface on its Wettability

Received on July 07, 2021
Accepted on August 05, 2021

Silicon is the basic material of microelectronics. It is made of rectifier, pulsed, microwave diodes, low frequency and high frequency, powerful and low-power bipolar transistors, field-effect transistors, charge-coupled devices. Silicon manufacturing the majority of diodes and thyristors. Silicon is widely used for the production of photosensitive devices: photodiodes and phototransistors. In addition, the silicon used to manufacture solar panels. Therefore, the study of the properties of silicon is relevant. In this study we investigated the influence of small doses of sodium chloride in water at an angle of draining the water droplets from the surface of the silicon. Surface wettability was determined by the following method. The sample was applied a drop of water of constant volume and inclination of the sample was recorded, the angle θ at which the drop began to drain from the surface. found that small doses of NaCl in water does not affect the angle of motion of the drops.

Keywords: adsorption, angle of motion, surface tension, HF etching, surface oxide, Si (111)

For citation:

Orakova M. M., Mustafaev G. A., Nagaplejeva R. R. Investigation of the Influence of the Purity of the Silicon Surface on its Wettability, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 9–12.

DOI: 10.17587/nmst.24.9-12

References

1. <https://ostec-materials.ru/materials/dlya-proizvodstva-plastiny-dlya-kristalnogo-proi.php>
2. **Soloveva E. S., Parshin A. S.** Spektroskopija karakteristicheskikh poter jenerгии jelektronov kremnievykh plastin v processe termicheskoj ochildki, *Aktualnye problemy aviacii i kosmonavtiki*, 2013, vol. 1, no. 9, pp. 142–143 (in Russian).
3. **Kovalevskij A. A., Strogova A. S., Komar O. M.** Issledovanie vlijanija chistoty poverhnosti podlozhek na process obrazovanija i transformaciju nanoklastero v kremnij-germanij, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 149–158 (in Russian).
4. **Nikiforov V. V., Uljanov V. V., Pcheljakov O. P.** et al. Rost i struktura nanoostrovkov Ge na atomarno chistoj poverhnosti okisi Si, *FTT*, 2004, vol. 46, no. 1, pp. 80–82 (in Russian).
5. **Vostokov N. V., Drozdov Ju. N., Krasilnik Z. F.** et al. Vlijanie predosazhdenija Si1 – xGex sloja na rost SiGe/Si samoformirujushihhsja ostrovkov, *FTT*, 2005, vol. 47, no. 1, pp. 29–32 (in Russian).
6. **Jaremko A. M., Valah M. Ja., Dzhagan V. N.** et al. Vza- imosvjaz minimumov poverhnostnoj jenerгии samoinducirovan- nyh nanoostrovkov SiGe i ih formy, *Fizika i tekhnika poluprovod- nikov*, 2006, vol. 40, no. 4, pp. 391–396 (in Russian).
7. **Kovalevskij A. A.** Suppression of Recrystallization Processes in Polycrystalline Silicon Films by Thin Layers of Amorphous Silicon, *Russian Microelectronics*, 1998, vol. 27, no. 1, pp. 16–21.
8. **Samoilov A. V., Du Bois D., Comita P. B., Carlson D.** Delicately Precleaned Reduces Epi's Thermal Budget, *Semiconductor International*, 2000, no. 11, pp. 73.
9. **Dong-Won Kim, Sungbo Hwang, Eolgar T. F., Sanjoy Banerjee.** Characterization of SiGe Quantum Dots on SiO₂ and HfO₂ Grown by Rapid Thermal Chemical Preposition for Nano- electronic Devider, *Journal of Electrochemical Society*, 2003, vol. 150, no. 4, pp. 240–243.
10. **Kovalevskij A., Strogova A., Strogova N., Babushkina N.** Correlation between the size of three-dimensional nanoclusters and C-V characteristics, *Proceedings of International conference nanomeeting-2013, Reviews and Short notes, Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*, 2013, pp. 629–631.
11. **Kern W.** Radiochemical study of semiconductor surface contamination. I. Adsorption reagent compounds, *RCA review*, 1970, vol. 31, pp. 207–233.
12. **Kovalevskij A., Strogova A., Strogova N., Babushkina N.** Investigation of Electrical Properties of MOS Structures with Silicon Nitride Films Doped with Rare Earth Elements, *Russian Microelectronics*, 2014, vol. 43, no. 4, pp. 246–251.
13. **Satoru Watanabe, Noriaki Nakayama, Takashi Ito.** Homogeneous hydrogen-terminated Si(111) surface formed using aqueous HF solution and water, *Applied Physics Letters*, September 16, 1991, vol. 59, no. 12, pp. 1458–1460.
14. **Braun E. A.** Photoresist stripping faces low-k challenges, *Semiconductor international*, 1999, vol. 22, no. 12, pp. 64–74.
15. **Kern W., Puotinen D. A.** Cleaning solutions based on hydrogen peroxide for use in silicon semiconductor technology, *RCA review*, 1970, vol. 31, pp. 187–206.
16. **Poltavcev Ju. G., Knjazev A. S.** Tehnologija obrabotki poverhnostej v mikroelektronike, Kiev: Tekhnika, 1990, 205 p. (in Russian).
17. **Kalinina N. V., Sokolov S. M., Ashhotov O. G., Chagaj E. O.** Podgotovka vody i metodika izmerenija kraevogo ugla smachivanija poverhnosti svinicosilikatnogo stekla 6Ba4, *Vestnik KBGU. Serija Fizicheskie nauki*, Nalchik, 2005, vol. 10, pp. 35–37 (in Russian).
18. **Voronov A. N.** Kolloidnaja himija. Moscow, Vysshaja shkola, 1987, 357 p. (in Russian).
19. **Moro U.** Mikrolitografija. V 2-ch. Ch.1 / Per.s. angl. M.: Mir, 1990, pp. 351 (in Russian).
20. **Korobcov V. V., Fidjanin O. N., Shaporenko A. P., Balashev V. V.** Vlijanie sposoba himicheskoj obrabotki na smachiv- aemost' poverhnosti Si (111), *Zhurnal tekhnicheskoj fiziki*, 1996, vol. 66, no. 12 (in Russian).

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 621.865.8

DOI: 10.17587/nmst.24.13-18

И. К. Хмельницкий, канд. хим. наук, вед. науч. сотр., khmelnitskiy@gmail.com,
В. В. Лучинин, д-р техн. наук, директор ИЦ ЦМИД, cmid_leti@mail.ru,
А. Н. Горляк, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., ellipsometry@mail.ru,
В. М. Айвазян, инженер, **Н. И. Алексеев**, д-р физ.-мат. наук, проф.,
А. П. Бройко, канд. техн. наук, доц., **Ю. Д. Орехов**, инженер,
А. М. Карелин, инженер, **Д. О. Тестов**, инженер,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

КОМПЛЕКС МИНИАТЮРНЫХ БИОНИЧЕСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Поступила в редакцию 10.09.2021

Представлен разработанный и реализованный комплекс миниатюрных бионических робототехнических систем, включающий плавающие и шагающие миниатюрные биоподобные роботы с низковольтными энергоэффективными приводами движения на основе ионных полимер-металлических композитов; миниатюрные автономные роботизированные зонды с вибродвижителем для перемещения по трубам малого диаметра и передачи видеосигнала по двухчастотному радиоканалу; сверхлегкую зооморфную летающую платформу с подвижным крылом — робот-орнитоптер "Колибри".

Ключевые слова: биоподобные роботы, миниатюрность, плавающие биороботы, шагающие биороботы, имитация движения, движители, ИПМК-актюаторы, эндоскопический сенсорно-информационный модуль, вибродвижитель, зооморфная платформа с подвижным крылом

Введение

В последнее время, благодаря достижениям новых производственных технологий, для различных целей было разработано множество миниатюрных роботов. Одной из особенностей таких роботов является возможность работы в очень малом пространстве. Например, их применение в области медицины обычно состоит в том, чтобы выполнить тонкую хирургическую операцию, поддерживаемую с помощью микромашин, избегая при этом ненужных разрезов. Также предлагается использование миниатюрных роботов в промышленности для обслуживания заводских трубопроводов [1].

В силу современных требований к обеспечению малоинвазивности условий эксплуатации подобных миниатюрных робототехнических систем особенно актуальной является разработка актюаторов и движителей, представляющих по своему целевому применению выгодную альтернативу традиционно используемым. При создании представленного в данной работе комплекса миниатюрных бионических робототехнических систем были учтены современные технические взгляды на новые технологичные материалы с экстраполяцией предварительных результатов как в смежные области науки и технологий, так и в не очень отдаленное будущее по характеру востребованности и эффективности использования.

Плавающие биороботы с движителями на основе ИПМК-актюаторов

Плавающие миниатюрные (малогабаритные) биоподобные роботы привлекли к себе большое внимание благодаря компактности, высокой эффективности, бесшумности движений и отличной управляемости. При разработке биороботов, имитирующих движения рыб, обычно рассматривают два основных типа движения: волнообразное и колебательное [2]. По другой классификации, если плавающий биоробот генерирует толчок изгибом тела и/или хвостового плавника, то результирующее движение называется ВСА-движением (*body and/or caudal actuator*). Если плавающий биоробот пользуется срединным килем, а также парными киями, то такое движение называется МРА-движением (*median and/or paired actuator*) [3].

В наших работах [3, 4] для создания движителей для плавающих биороботов были использованы актюаторы на основе ионных полимер-металлических композитов (ИПМК), которые характеризуются легкостью, гибкостью, низким управляющим напряжением и высоким значением деформации изгиба. ИПМК представляют собой ионообменную мембрану Nafion, на которую с обеих сторон нанесены металлические электроды [5, 6].

Для исследования поведения в водной среде биороботов на основе ИПМК-актюаторов были разработаны робототехнические системы, представленные в табл. 1 (см. вторую сторону обложки).

Система "Угорь" разработана для имитации и изучения волнообразного движения биоробота. В ее состав входят источник питания, радиомодуль, главный модуль управления, движитель и модуль управления ИПМК-актюаторами. Движитель состоит из семи пассивных частей, соединенных последовательно с помощью пар ИПМК-актюаторов. Нечетные пары актюаторов обеспечивают перемещение в одну сторону, четные пары — в противоположную сторону. Актюаторы и пассивные части обеспечивают имитацию волнообразного движения тела угря с возможностью изменения амплитуды и шага колебаний.

Система "Скат" разработана для имитации и изучения колебательного движения плавников. Ее состав аналогичен составу системы "Угорь" и отличается только формой и движителем. Движитель состоит из пары плавников, каждый из которых состоит из активной части (двух неза-

висимо управляемых ИПМК-актюаторов) и пассивной части (листа стеклотекстолита толщиной 0,2 мм). Плавники расположены по бокам в средней части системы и совершают поступательные движения вверх-вниз. Для обеспечения устойчивости системы в жидкой среде предусмотрены дополнительные пассивные плавники, расположенные в "хвосте".

В работе [3] было продемонстрировано, что система "Скат", на которой исследовали колебательное МРА-движение, характеризуется более высокой скоростью, чем система "Угорь", на которой исследовали волнообразное ВСА-движение. По этой причине для дальнейшего увеличения выходных характеристик в работе [4] было проведено усовершенствование конструкции скатоподобной роботизированной рыбы, имитирующей волнообразное МРА-движение.

Для имитации и изучения волнообразного движения плавников была разработана система "Скат" второго поколения (далее — "Скат-2"). Движитель состоит из пары плавников, каждый из которых состоит из активной части (шести параллельно соединенных ИПМК-актюаторов) и пассивной части. Выступающие из плавника актюаторы вставлены в соответствующие зажимы в корпусе, снабженные золотыми контактами. Плавники расположены по бокам в средней части системы и совершают поступательные движения "вверх-вниз". Алгоритм движения системы "Скат-2" представляет собой поочередное движение нечетных и четных ИПМК-актюаторов с задержкой 0,2...0,3 с. Таким образом происходит волнообразный изгиб плавника и задается импульс для толчка.

Шагающие биороботы с движителями на основе ИПМК-актюаторов

Мобильные роботы должны работать длительное время без подзарядки, поэтому конструкции с восемью и более конечностями не эффективны. "Двуногие" роботы потребляют меньше энергии, но имеет меньшую статическую устойчивость и, соответственно, меньшие возможности при выборе маршрута движения по неподготовленной поверхности. Анализ принципов движения живых организмов и микро(мини)-роботов позволяет сделать вывод о целесообразности создания шагающих устройств с числом "ног" 4...6 [7]. Таким образом, наши работы посвящены разработке и созданию "четырёхногого" [8, 9] и "шестиногого" прототипов шагающих ро-

бототехнических систем с двигателями на основе ИПМК-актюаторов.

Для исследования поведения на плоской поверхности микро(мини)роботов на основе ИПМК-актюаторов были разработаны новые перспективные биомиметические робототехнические системы, представленные в табл. 2 (см. третью сторону обложки).

С использованием привода на основе ИПМК-актюатора был разработан автономный мини-робот "Конь". Он состоит из четырех "ног" с двумя степенями свободы и каркаса с системой управления, радиомодулем и источником питания. Каждая "нога" представляет собой систему из S-образной ступни и шарнирно сочлененных поступательных приводов, один из которых осуществляет движение в вертикальном направлении, а другой — в горизонтальном. За счет подачи управляющего напряжения на актюаторные модули приводы "ног" совершают поступательные движения. Такая конструкция обеспечивает латеральное поступательное движение "ноги" вдоль рабочей поверхности. Для передвижения "Коня" была реализована простая схема движения с поочередной перестановкой "ног".

Микроробот "Жук" состоит из трех одинаковых M-образных модулей, соединенных осью. Каждый модуль имеет две "ноги". "Нога" состоит из двух ИПМК-актюаторов, соединенных последовательно с помощью специальной оснастки. Система управления и источник питания находятся вне корпуса и соединены с "Жуком" гибкими проводами. "Жук" реализует другой принцип передвижения. Благодаря наличию шести "ног" он уравновешен в пространстве. Во время передвижения поднимаются крайние "ноги" с одной стороны и средняя "нога" с другой стороны. При этом тело микроробота находится в устойчивом положении благодаря опоре на незадействованные три "ноги". Затем поднятые "ноги" опускаются, а опорные "ноги" поднимаются и таким образом осуществляется передвижение.

Для реализации более быстрых адаптивных алгоритмов передвижения с одновременным перемещением нескольких конечностей был разработан "шестиногий" мини-робот "Многоножка". "Ноги" мини-робота состоят из трех подвижных членов, выполненных в виде траверс и вращающихся вокруг трех осей. ИПМК-актюаторы расположены по обе стороны от траверс. "Ноги" крепятся к корпусу, который представляет собой закрытый короб в виде цилиндра с креплениями под "ноги". Внутри корпуса распо-

ложены платы системы управления и аккумулятор. Для предотвращения попадания воды внутрь корпуса его герметизируют. Эффективным способом передвижения является одновременная перестановка двух или трех "ног". Для передвижения мини-робота "Многоножка" были разработаны адаптивные алгоритмы типа "3 + 3" и "2 + 4".

Для определения касания поверхности конечностью шагающего робота была разработана конструкция контактного датчика, которая основана на измерении положения "копыта" робота, присоединенного к "ноге" через шарнирное соединение, которое при этом изгибалось встроенный в систему ИПМК-сенсор.

Миниатюрный автономный эндоскопический сенсорно-информационный модуль "Червь"

Для анализа возможности проведения оперативной диагностики трубных полостей малых диаметров бионическими роботами на основе вибродвигателя была разработана робототехническая система с миниатюрным автономным эндоскопическим сенсорно-информационным модулем "Червь". Изготовленный экспериментальный модуль позволяет реализовать движение внутри гладких цилиндрических каналов и проводить мониторинг состояния внутритрубных полостей и отверстий малого диаметра. Разработанный рабочий макет представляет собой самодвижущуюся роботизированную платформу с размещенными на борту функциональными модулями, обеспечивающими дистанционное управление, а также регистрацию и передачу по радиоканалу на внешнее приемное устройство сигналов от одного или двух бортовых видеосенсоров.

Система питания автономного сенсорно-информационного модуля предусматривает размещение на борту помимо литий-полимерного аккумулятора платы стабилизаторов напряжения и тока для обеспечения работоспособности видеосенсоров и системы подсветки соответственно. Миниатюрная система дистанционного управления по радиоканалу на частоте 2,4 ГГц предусматривает наличие бортового четырехканального приемника, реализующего управление вибродвигателем, а также переключение видеосенсоров и диапазона подсветки. Освещение инспектируемой области реализовано посредством светодиодов видимого и ближнего инфракрасного диапазона (~850 нм). Вибродвигатель выполнен

на основе помещенного в полый металлический корпус миниатюрного коллекторного электродвигателя с эксцентриком, а также полимерных анизотропных пластинок-толкателей, реализующих перемещение бионической платформы относительно стенок цилиндрического канала. Для исключения осевого вращения бионическая платформа снабжена стабилизатором, выполненным на основе одноплоскостных адаптивных колесных подвесок (табл. 3).

В результате экспериментов, проведенных с системой "Червь", было установлено, что такая система способна работать в каналах различных типов трубопроводов: полимерных, керамических, стеклянных, текстильных. Для обеспечения двустороннего движения биоробота необходимо использование второго силиконового актюатора, установленного зеркально первому, а для изменения направления движения под силиконовыми пластинками-толкателями каждого из актюаторов должны быть предусмотрены подвижные кольца-расширители, которые могли бы попеременно сдвигаться относительно актюаторных пластин вдоль виброкорпуса.

Анализ дистанционно переданных стереопар фотоснимков, полученных посредством борто-

вых сенсорных модулей, позволяет реализовать методом стереофотограмметрии определение габаритных размеров зарегистрированных особенностей, дистанции до них от передней поверхности объективов видеосенсоров в диапазоне 10...45 мм, а также построение трехмерной реконструкции пространственной области, содержащей выделенные особенности. При условии получения фотоснимков в состоянии с выключенным вибродвижителем погрешность измерения геометрических параметров не превышает 1 % от дистанции.

Сверхлегкий миниатюрный беспилотный летательный аппарат — махолет со встроенными системами навигации и видеосенсорики — "Колибри"

Для решения широкого круга задач, например, связанных с мониторингом труднодоступных или опасных для пребывания человека территорий или с наблюдением за поведением животных в их естественной среде обитания, наиболее перспективными средствами на сегодняшний день являются бионические роботизированные системы. Нами была создана зооморфная летающая платформа с подвижным крылом — робот-орнитоптер "Колибри". Это позволило изучить перспективы технической реализации миниатюрных летающих роботов с учетом современного уровня развития технологий производства электронных, механических, а также конструктивных элементов.

Главным конструктивным преимуществом разработанной системы является гармоничная реализация принципов построения приводных и управляющих электромеханических модулей, а также функциональной нагрузки сенсорных электронных блоков.

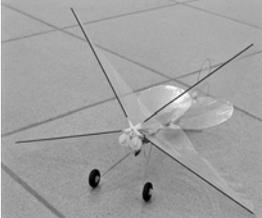
В основе конструкции силового привода миниатюрного орнитоптера заложен принцип "иксообразного" подвижного крыла. Силовой приводной модуль представляет собой кривошипно-шатунный механизм, инициируемый коллекторным миниатюрным двигателем. Парные синхронные противофазные движения как левых, так и правых частей крыла максимально компенсируют периодические амплитудные перемещения корпуса, что обеспечивает возможность размещения на борту двух миниатюрных видеокамер, способных регистрировать видеоинформацию с приемлемым качеством. При выключении питания маршевого двигателя по-

Таблица 3

Миниатюрный автономный эндоскопический сенсорно-информационный модуль "Червь"

Название	Изображение	Характеристики и особенности
"Червь"		<ul style="list-style-type: none"> • Размеры: 150 × 10 мм; • мощность модуля передачи изображения по радиоканалу: 100 мВт; • видеосенсор: 2 цветные КМОП-матрицы с разрешением 320 × 240; • диапазон определения дистанции от передней поверхности объективов до объектов: 10...45 мм; • несущая частота системы дистанционного управления по радиоканалу: 2,4 ГГц; • максимальная скорость перемещения: 11 мм/с

Сверхлегкий миниатюрный беспилотный летательный аппарат — "Колибри"

Название	Изображение	Характеристики и особенности
"Колибри"		<ul style="list-style-type: none"> • Размеры: 150 × 10 мм; • мощность модуля передачи изображения по радиоканалу: 100 мВт; • телеметрические сенсоры: барометр, акселерометр, магнетометр, термометр; • видеосенсоры: две цветные КМОП-матрицы с разрешением 320 × 240; • максимальная масса: 15 г; • несущая частота системы дистанционного управления: 2,4 ГГц; • максимальная скорость перемещения: 5 м/с

добная система переходит в режим свободного стабилизированного планирования. Усиленная стабилизация при этом обеспечивается симметричными парными элементами крыла, а изменение направления полета реализуется посредством руля направления на базе электромагнитного актюатора, расположенного в хвостовом оперении орнитоопера (табл. 4).

Результаты оптимизации технологических решений при создании данной роботизированной системы наиболее четко проявляют себя, прежде всего, в конструкции двойного видеосенсора, позволяющего в режиме свободного планирования получать стереопары фотоснимков и передавать их дистанционно по радиоканалу на внешнее приемное устройство в целях оценки дистанции до объектов и их габаритных размеров. Углеродные конструктивные элементы платформы, оснований крыльев и системы стабилизации обеспечивают необходимую жесткость, надежность и минимальную массу орнитоопера.

В конструкции предусмотрена возможность крепления дополнительной механической защиты корпуса из сверхлегких пеноматериалов посредством неодимовых магнитов, что не создает каких-либо препятствий для мгновенной замены аккумулятора и оперативного ремонта в случае неисправности.

Заключение

Представлен разработанный и созданный комплекс миниатюрных бионических робототехнических систем, состоящий из плавающих, шагающих и летающих биороботов, а также миниатюрных автономных роботизированных зондов для перемещения по трубам. Плавающие и шагающие бионические роботы оснащены двигателями на основе актюаторов из ионных полимер-металлических композитов. Такие биороботы способны имитировать природные объекты и могут работать в водной и наземной средах. К достоинствам двигателей относятся легкость, гибкость, низкие управляющие напряжения и регулируемая частота работы. Миниатюрные автономные роботизированные зонды с вибродвигателем предназначены для перемещения по малоразмерным трубам, инспекции внутритрубного пространства с передачей полученного видеосигнала по двухчастотному радиоканалу. Сверхлегкая зооморфная летающая платформа с подвижным крылом — робот-орнитооптер "Колибри" — предназначена для мониторинга труднодоступных или опасных для пребывания человека территорий или для наблюдения за поведением животных в их естественной среде.

Работа в части разработки плавающих и шагающих биороботов выполнена в рамках гранта РФФИ, проект № 16-19-00107.

Список литературы

1. Guo S., Fukuda T., Asaka K. A New Type of Fish-like Underwater Microrobot // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2003. Vol. 8, N. 1. P. 136—141.
2. Fish F. E. Swimming in Fish. John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
3. Бройко А. П., Каленов В. Е., Хмельницкий И. К. и др. Двигатели на основе электроактивных полимеров для водных биомиметических робототехнических систем // Биотехносфера. 2017. № 6 (54). С. 21—27.
4. Karelin A. M., Orekhov Yu. D., Khmelniyskiy I. K. et al. Biomimetic Stingray-like Robotic Fish with Propulsors Based on IPMC Actuators // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), January 26—29, 2021. St. Petersburg and Moscow, Russia. P. 922—925.
5. Корляков А. В., Хмельницкий И. К., Бройко А. П. и др. Разработка микроактюаторов на основе электроактивных полимеров для биомиметических робототехнических систем // Биотехносфера. 2015. № 6 (42). С. 41—47.
6. Корляков А. В., Лучинин В. В., Хмельницкий И. К. и др. Актюаторы на основе ионных полимер-металлических композитов // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 5. С. 277—285.
7. Ding X., Wang Z., Rovetta A., Zhu J. M. Locomotion analysis of hexapod robot // Climbing and Walking Robots. 2010. P. 291—309.

8. Каленов В. Е., Орехов Ю. Д., Хмельницкий И. К. и др. Движители на основе электроактивных полимеров для шагающих биомиметических робототехнических систем // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7, № 3. С. 64–70.

9. Kalyonov V. E., Orekhov Yu. D., Khmelniitskiy I. K. et al. Walking Robot with Propulsors Based on IPMC Actuators // Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), October 17–18, 2019. St. Petersburg, Russia. P. 169–172.

I. K. Khmelniitskiy, Ph. D., Leading Researcher, khmelniitskiy@gmail.com,
V. V. Luchinin, D. Sc., Director of IC CMID, cmid_leti@mail.ru,
A. N. Gorlyak, Ph. D., Leading Researcher, ellipsometry@mail.ru, **V. M. Aivazyan**, Engineer,
N. I. Alekseyev, D. Sc., Professor, **A. P. Broyko**, Ph. D., Associate Professor,
Yu. D. Orekhov, Engineer, **A. M. Karelin**, Engineer, **D. O. Testov**, Engineer
St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin),
St. Petersburg, 197376, Russian Federation

Corresponding author:

Khmelniitskiy Ivan K., Ph. D., Leading Researcher, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin), St. Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: khmelniitskiy@gmail.com

Complex of Miniature Bionic Robotic Systems

Received on September 10, 2021

Accepted on September 28, 2021

The developed and implemented complex of miniature bionic robotic systems is presented, including swimming and walking miniature biosimilar robots with low-voltage energy-efficient motion drives based on ionic polymer-metal composites; miniature autonomous robotized probes with a vibration propulsor for moving through small-diameter pipes and transmitting a video signal over a two-frequency radio channel; an ultralight zoomorphic flying platform with a movable wing — a robot ornithopter "Hummingbird".

Keywords: biosimilar robots, miniaturization, swimming biorobots, walking biorobots, motion imitation, propulsors, IPMC actuators, endoscopic sensor-information module, vibration propulsor, zoomorphic platform with movable wing

For citation:

Khmelniitskiy I. K., Luchinin V. V., Gorlyak A. N., Aivazyan V. M., Alekseyev N. I., Broyko A. P., Orekhov Yu. D., Karelin A. M., Testov D. O. Complex of Miniature Bionic Robotic Systems, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 13–18.

DOI: 10.17587/nmst.24.13-18

References

1. Guo S., Fukuda T., Asaka K. A New Type of Fish-like Underwater Microrobot, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2003, vol. 8, no. 1, pp. 136–141.
2. Fish F. E. Swimming in Fish. John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
3. Broyko A. P., Kalyonov V. E., Khmelniitskiy I. K. et al. Dvizhiteli na osnove elektroaktivnykh polimerov dlya vodnykh biomimeticheskikh robototekhnicheskikh sistem, *Biotekhnosfera*, 2017, no. 6 (54), pp. 21–27 (in Russian).
4. Karelin A. M., Orekhov Yu. D., Khmelniitskiy I. K. et al. Biomimetic Stingray-like Robotic Fish with Propulsors Based on IPMC Actuators, *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, January 26–29, 2021. St. Petersburg and Moscow, Russia, pp. 922–925.
5. Korlyakov A. V., Khmelniitskiy I. K., Broyko A. P. et al. Razrabotka mikroaktyuatorov na osnove elektroaktivnykh polimerov dlya biomimeticheskikh robototekhnicheskikh sistem, *Biotekhnosfera*, 2015, no. 6 (42), pp. 41–47 (in Russian).
6. Korlyakov A. V., Luchinin V. V., Khmelniitskiy I. K. et al. Aktyuatory na osnove ionnykh polimer-metallicheskih kompozitov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 5, pp. 277–285 (in Russian).
7. Ding X., Wang Z., Rovetta A., Zhu J. M. Locomotion analysis of hexapod robot, *Climbing and Walking Robots*, 2010, pp. 291–309.
8. Kalyonov V. E., Orekhov Yu. D., Khmelniitskiy I. K. et al. Dvizhiteli na osnove elektroaktivnykh polimerov dlya shagayushchikh biomimeticheskikh robototekhnicheskikh sistem, *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*, 2019, vol. 7, no. 3, pp. 64–70 (in Russian).
9. Kalyonov V. E., Orekhov Yu. D., Khmelniitskiy I. K. et al. Walking Robot with Propulsors Based on IPMC Actuators, *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, October 17–18, 2019. St. Petersburg, Russia, pp. 169–172.

П. А. Александров, д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., директор Института информационных технологий НИЦ КИ, e-mail: Alexandrov_PA@nrcki.ru,

С. С. Фанченко, канд. физ.-мат. наук, нач. лаб. рентгеновской диагностики поверхности Института информационных технологий НИЦ КИ, e-mail: ssfan@mail.ru,

Е. В. Ефименко, инженер-исследователь, e-mail: el.vl.efimenko@gmail.com, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" (НИЦ КИ), Москва

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ НА РАБОТУ МОП-ТРАНЗИСТОРА

Поступила в редакцию 22.08.2021

Рассмотрена методика оценки отказоустойчивости работающего полупроводникового устройства к действию тяжелых заряженных частиц галактического происхождения. Проведен анализ влияния ионизирующего излучения на электронное устройство.

Ключевые слова: эффекты единичного события, космические лучи, тяжелая заряженная частица, амбиплярная диффузия, зарядовая воронка, радиационные эффекты, скейлинговый фактор, толщина обедненной области, отказоустойчивость, критический заряд

Введение

Влияние космического излучения на микроэлектронику в настоящее время вызывает значительные опасения и является одним из приоритетных направлений. Проблема радиационного воздействия на интегральные схемы не нова, ее десятилетиями изучали и принимали во внимание при проектировании в различных областях. Первый задокументированный сбой в космосе был опубликован в 1975 г. [1]. Однако возникновение радиационно-индуцированных явлений в электронных схемах обсуждалось еще в 1962 г. [2]. На протяжении 60 лет интерес и актуальность развития исследований в области повышения радиационной стойкости интегральных микросхем только возрастает.

Наибольшую опасность представляют тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ), которые составляют 1 % от всех галактических лучей. При прохождении высокоэнергетического иона через чувствительную область микросхемы образуется локальная ионизация вдоль трека частицы, которая может привести к генерации заряда [3]. Образовавшиеся электронно-дырочные пары вызывают импульсы тока и напряжения, ведущие к возникновению одиночных радиационных эффектов (ОРЭ). С увеличением степени интеграции микросхем на первый план выходят слу-

чайные одиночные события (Single Event Upsets, SEU) [4].

В настоящее время часто используют моделирование с использованием пакетов технологий автоматизированного проектирования (TCAD) [5]. Симулятор Sentaurus-DEVICE [6] позволяет моделировать как эффекты единичного события, так и эффекты общей дозы ионизации (TID). Другие численные подходы включают конечные элементы: FEMOS [7], простые предположения о переносе заряда: HORUS [8]. Для этих инструментов моделирования обычно требуются другие программные среды, например IDL, Root, и их нелегко получить. Необходимость финансовых вложений и обязательное специализированное обучение приводит к целесообразности предложения нового подхода для быстрого анализа отказоустойчивости микросхемы.

В работе рассматриваются с помощью модели усредненной зарядовой воронки физические процессы, протекающие при попадании ТЗЧ. Используется достаточно простое аналитическое выражение для сбора заряда и упрощенное выражение для толщины чувствительной области, которое при анализе микросхемы позволяет оценить восприимчивость к одиночным событиям. Также представлено теоретическое прогнозирование вероятностей сбоев некоторых микросхем.

1. Радиационные эффекты в микросхемах, вызванные воздействием тяжелых заряженных частиц

Радиационные эффекты в микроэлектронике можно разделить на две общие категории: эффекты, вызванные накоплением полной поглощенной дозы (Total Ionizing Dose, TID) и эффекты единичного события (Single Event Effects, SEE). Кроме того, необходимо учитывать воздействие неионизирующего излучения (эффекты смещения).

Эффект полной дозы TID вызван длительным воздействием ионизирующего излучения на схему. Кумулятивные эффекты приводят к постепенному изменению рабочих параметров устройств, таких как ток утечки, пороговое напряжение и т. д.

Эффекты единичного события возникают при воздействии высокоэнергетических одиночных ионизирующих частиц на микросхему. Сбой при единичном событии (SEU) обычно представляет собой переходный импульс или перевернут битов [9].

Космические лучи состоят на 85 % из протонов и на 15 % из ядер гелия, ядер более тяжелых атомов, электронов. Тяжелые ионы частично преобразуются во вторичные нейтроны в результате столкновений с ядрами материала устройства. Эти вторичные нейтроны могут представлять дополнительную угрозу вследствие эффектов единичного события (SEE) в электронике, вызванного заряженными частицами, получившимися в результате ядерных реакций [10].

Теоретические предсказания эффектов единичного события требуют понимания переноса заряда в присутствии трека иона. Рассмотрим

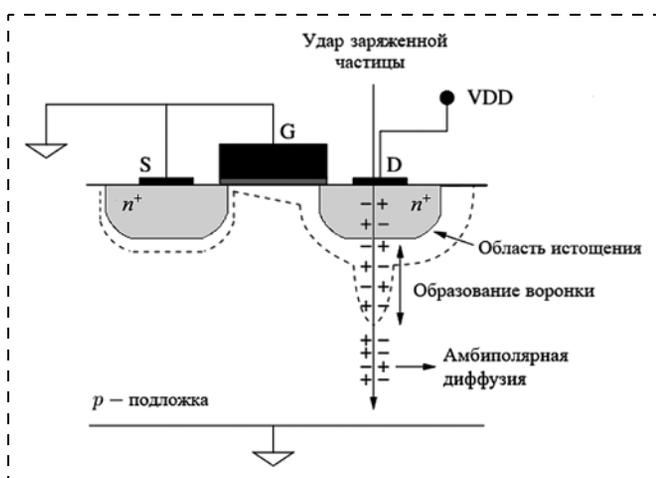


Рис. 1. Эффект образования зарядовой воронки

процессы, возникающие при попадании тяжелой заряженной частицы в чувствительную область микросхемы. При прохождении частицы через полупроводниковый материал, вдоль трека генерируются электронно-дырочные пары, как показано на рис. 1.

На рис. 1 переход стока NMOS транзистора имеет обратное смещение. Как известно, обратно-смещенные области $p-n$ -перехода в конструкции СБИС являются наиболее чувствительными к ударам ионизирующих частиц. Это связано с наличием сильного электрического поля в области истощения, смещенного в обратном направлении $p-n$ -перехода, которое может эффективно собирать индуцированный излучением заряд [11].

Однородно легированная подложка формирует четкое определение границы области обеднения, которая отделяет область пространственного заряда от квазинейтральной области.

Предположим, что частица излучения попадает в этот переход и генерирует электронно-дырочные пары на своем пути. Сразу после образования ионизированного трека область истощения нарушается вследствие перестройки заряда, присутствующего в области обеднения. Перегруппировка заряда происходит ввиду наличия сильного электрического поля, которое притягивает электроны вверх и толкает дырки вниз (к p -подложке). Это явление уменьшает ширину обедненной области стокового перехода.

В результате, уменьшение потенциала в обедненной области вызывает падение напряжения в p -области подложки. Это приводит к тому, что электрическое поле стокового перехода проникает в область p -подложки за пределы исходной области обеднения и, следовательно, усиливает поток неравновесных неосновных носителей заряда — электронов с подложки к поверхности области истощения. Этот процесс расширенного потока электронов называется "воронкой". Электроны, присутствующие в области обеднения, дрейфуют в осевом направлении в области стока и, следовательно, собираются.

Поскольку электрическое поле за пределами области истощения, в квазинейтральной области, продолжает извлекать электроны вверх, оно также способствует неравновесным основным носителям заряда (дыркам) растекаться радиально от оси трека в основном вследствие амбиполярной диффузии [12], что позволяет области истощения восстанавливать свою первоначальную ширину. После восстановления обедненной

области электроны, которые не были собраны в процессе дрейфа с помощью воронки, диффундируют в сторону обедненной области, а затем притягиваются электрическим полем перехода к диффузионной области n^+ -стока.

Как известно, в слаболегированной подложке большая часть сбора заряда происходит только за счет дрейфа, тогда как более сильнолегированные подложки демонстрируют сбор заряда за счет как дрейфовых, так и диффузионных процессов [13].

2. Количественное описание физических процессов, протекающих при попадании ТЗЧ

Плотность носителей заряда. Для нахождения избыточной концентрации неравновесных носителей при попадании тяжелой заряженной частицы необходимо найти максимальный радиус (b_{\max}), на который может быть оторван электрон от своего основного атома, однако надо учитывать, что часть электронов в полупроводнике коллективизирована. Хорошо известно, что длинноволновыми возбуждениями валентных электронов в полупроводниках являются плазмоны, а коротковолновыми — отдельные электроны, при этом граница, с которой начинается возбуждение отдельных электронов, определяется соотношением [14]

$$b_{\max} \gg \frac{v}{\omega_j}, \quad (1)$$

где v — скорость заряженной частицы; ω_j — плазменная частота для валентных электронов в кремнии.

Плотность носителей заряда определяется с помощью выражений

$$n = \frac{Y}{\pi(b_{\max})^2}, \quad Y = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \frac{\rho_{\text{Si}}}{E_{e-h}}, \quad (2)$$

где Y — число пар, рожденных на единицу длины; $\frac{dE}{dx}$ — ионизационные потери ТЗЧ с энергией E в кремнии; ρ — плотность материала; E_{e-h} — энергия образования электронно-дырочной пары.

Для обеспечения возможности прогнозирования вероятности отказа интегральной схемы необходима информация о количестве заряда, собранном после воздействия ТЗЧ на микросхему [15]. В качестве мгновенного сбора заряда используется модель усредненной зарядовой во-

ронки [16] с эффективной толщиной обедненного слоя L_c :

$$Q_c = eYL_c. \quad (3)$$

Для случая, когда эффективная толщина обедненного слоя намного больше толщины обедненного слоя в p — n -переходе до попадания ТЗЧ (d_0), формула (3) приобретает вид:

$$Q_c = eY\sqrt{\mu_n}V_0 \left(\frac{3Y}{8\pi N_A v_p \sqrt{D}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

где e — электрический заряд электрона; μ_n — подвижность электронов; V_0 — скачок потенциала; N_A — акцепторная примесь (см. рис. 1); v_p — скорость убывания дырок; D — коэффициент амбиполярной диффузии.

Толщина чувствительной области. С момента попадания ионизирующей частицы в интегральную микросхему изменяется геометрия обедненной области. Для нахождения эффективной толщины обедненной области, включая зарядовую воронку, была предложена модель Ху (Ни) [17]:

$$d = d_0 \left(1 + \frac{\mu_n}{\mu_p} \right), \quad (5)$$

где d_0 — толщина обедненного слоя в p — n -переходе до попадания ТЗЧ, μ_n , μ_p — подвижности электронов и дырок, соответственно.

В рассматриваемой теории толщина обедненной области с зарядовой воронкой определяется следующим выражением:

$$L_c = \frac{d_0 + \sqrt{d_0^2 + 4\mu_n V_0 \tau_c}}{2}, \quad (6)$$

где V_0 — скачок потенциала в обедненной области; τ_c — время сбора заряда. Сопоставление этой величины, рассчитанной по формулам (5), (6), дает оценку точности вычислений в рассматриваемом приближении.

При угле падения θ энергетические потери увеличиваются в $1/\cos\theta$ раз, соответственно и значение параметра Y также увеличивается.

Время сбора заряда. Для сбора заряда с помощью диффузионно-дрейфового метода необходимо разделение заряда на электроны и дырки в треке частицы. Как правило, происходит два типа разделения зарядов, называемые радиальными и продольными. В самом начале роста зарядовой воронки плотность частиц внутри выше и радиальное разделение электронов и дырок про-

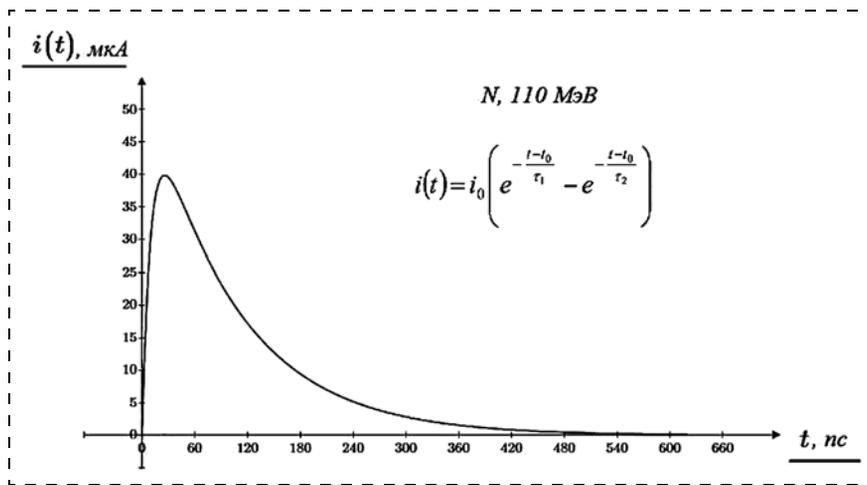


Рис. 2. График импульса тока для частицы N 110 МэВ, время сбора заряда составляет 0,63 нс

ходит вблизи края воронки. Электроны, присутствующие в области обеднения, дрейфуют в осевом направлении в области стока. Неравномерные основные носители заряда (дырки) расходятся радиально от оси трека за счет амбиполярной диффузии. По мере уменьшения плотности зарядовой воронки по всей поверхности область истощения восстанавливает свою первоначальную ширину.

В работе за основу берется механизм радиального разделения заряда и рассчитывается время сбора заряда, как время, необходимое для истощения плотности зарядовой воронки на поверхности. В качестве радиуса воронки используется длина амбиполярной диффузии. Скорость изменения линейной плотности электронно-дырочных пар $Y(t)$ вблизи поверхности связана с исходящим потоком дырок $J_p = N_A v_p$ соотношением,

$$\frac{dY}{dt} = -2\pi r(t)J_p = -4\pi N_A v_p \sqrt{Dt}. \quad (7)$$

Время сбора τ_c — время, когда $L(t) = 0$, оно определяется выражением

$$\tau_c = \left(\frac{3Y}{8\pi N_A v_p \sqrt{D}} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (8)$$

При попадании ионизирующей частицы в микросхему происходит скачок импульса тока. Для достаточно точного моделирования электрического поведения ячейки при прохождении частицы [18] в работе используется форма волны, называемая двойной экспоненциальной, которая показана на рис. 2.

Сбор заряда за счет дрейфа составляет доли наносекунды, а за счет амбиполярной диффузии — наносекунды (табл. 1). Как показано в работе [19] время рекомбинации на порядки меньше рассматриваемого процесса. В связи с этим в данной работе не рассматривается механизм рекомбинации.

Результаты. В работе были проведены расчеты для тестовой модели NMOS-транзистора четырех мегабитных микросхем памяти CMOS SRAM Mosaic MSM8512 (технология 0,5 мкм) [20] при легировании ($N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_D = 10^{18} \text{ см}^{-3}$)

с ионизирующими частицами Li, N и C с энергиями 10, 110 и 65 МэВ, соответственно.

Проведенные расчеты показали локальную повышенную плотность носителей заряда $\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$, сравнимую с атомарной концентрацией. Значительно увеличенная плотность носителей заряда по сравнению с легирующей примесью является убедительным доказательством нарушения равновесного состояния системы и может привести к сбою полупроводникового устройства.

Как показано в работе [20], толщина чувствительной области для рассмотренных микросхем составляет 2 мкм, поэтому в случаях, когда значение L_c по формуле (6) превышало 2 мкм, при расчете накопленного заряда Q_c по формуле (3), ее заменяли на 2 мкм.

Таблица 1

Результаты расчетов параметров для технологии 0,5 мкм

Параметры	Li, 10 МэВ	N, 110 МэВ	C, 65 МэВ
Плотность носителей заряда, см^{-3}	$5,3 \cdot 10^{22}$	$1,79 \cdot 10^{22}$	$2,12 \cdot 10^{22}$
Число пар, рожденных на единицу длины, см^{-1}	$8,15 \cdot 10^8$	$13,4 \cdot 10^8$	$13,07 \cdot 10^8$
Собранный заряд, Кл	$2,6 \cdot 10^{-14}$	$4,28 \cdot 10^{-14}$	$4,18 \cdot 10^{-14}$
Скачок напряжения, В	1,08	1,78	1,74
Время сбора заряда, нс	0,32	0,46	0,45
Эффективная толщина обедненного слоя, см	$2,11 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$2,38 \cdot 10^{-4}$
Оценка точности, %	36	27,27	27,8

Таблица 2

Результаты расчетов параметров для технологии 65 нм

Параметры	Li, 10 МэВ	N, 110 МэВ	C, 65 МэВ
Плотность носителей заряда, см ⁻³	$5,3 \cdot 10^{22}$	$1,79 \cdot 10^{22}$	$2,12 \cdot 10^{22}$
Число пар, рожденных на единицу длины, см ⁻¹	$8,15 \cdot 10^8$	$13,4 \cdot 10^8$	$13,07 \cdot 10^8$
Собранный заряд, Кл	$2,6 \cdot 10^{-14}$	$4,28 \cdot 10^{-14}$	$4,18 \cdot 10^{-14}$
Скачок напряжения, В	65,2	107,2	104,56
Время сбора заряда, нс	0,45	0,63	0,62
Эффективная толщина обедненного слоя, см	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$1,68 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$
Оценка точности, %	28,29	18	17,5

Эффективная толщина обедненной области в модели Ху, включая зарядовую воронку (d), составляет для технологии 500 нм $3,3 \cdot 10^{-4}$ см и для технологии 65 нм $2,05 \cdot 10^{-4}$ см, что несколько превышает наши расчеты (табл. 1, 2), однако наличие чувствительного слоя толщиной 2 мкм существенно уменьшает различия в значении накопленного заряда.

В работе также представлены результаты скачков напряжения после воздействия ТЗЧ на микросхему (табл. 1, 2). Анализ чипов двух технологий (0,5 мкм и 65 нм) показал высокую вероятность сбоев для интегрального устройства с меньшими размерами. Как и было замечено в работе [21], геометрические размеры микросхемы играют немаловажную роль в радиационной стойкости системы.

3. Масштабирование процесса

Первые попытки предсказать, как масштабирование устройства повлияет на одиночный сбой в космосе, были предприняты Петерсенем и др. в 1982 г. [22]. Выражение описывает пропорциональность критического заряда квадрату размера элемента. Данная зависимость рассматривалась для микросхем микрометрового размера с рабочим напряжением 5 В.

Однако при рассмотрении интегрального устройства субмикрометровых размеров авторы статьи склоняются к использованию скейлинга для накопленного потенциала с учетом того, что напряжение питания снижается с уменьшением размера. Тогда скейлинговый фактор для технологий 0,5 мкм и 65 нм определяется как

($V_{5В}$ и $V_{1,2В}$ — расчетные значения скачков напряжения вследствие пролета ТЗЧ в соответствующих микросхемах):

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{V_{5В}}{V_{1,2В}}\right)}{\ln\left(\frac{500}{65}\right)}. \quad (9)$$

Результаты вычислений представлены в табл. 3 для ионизирующих частиц Li, N и C с энергиями 10, 110 и 65 МэВ соответственно.

Как видно из табл. 3, в субмикрометровом масштабе скейлинг продолжает работать, но с меньшим показателем.

4. Оценка сечения и вероятности сбоя

Для оценки воздействия одиночного события (SEU) на схему используют параметр поперечного сечения (см²/бит) [23]. Поперечное сечение области воздействия показывает область, чувствительную к SEU, на бит. Чем меньше поперечное сечение, тем устройство менее чувствительно к облучению частицами.

Для переключения бита при заданном напряжении необходима критическая энергия E_c и, соответственно, минимальный критический заряд $Q_{cr}(V_0)$, которые определяются как

$$E_c = \frac{E_{e-h} Q_{cr}}{q}; \quad (10)$$

$$Q_{cr} = \frac{1}{2} C_{in} V_0, \quad (11)$$

где V_0 — рабочее напряжение на плате; C_{in} — емкость для CMOS ячейки (для технологии 0,5 мкм составляет 24 фФ, для технологии 65 нм — 0,37 фФ).

При прохождении ионизирующей частицы через полупроводниковое устройство вдоль трека образуются избыточные носители заряда. Для накопления критического заряда Q_{cr} частица должна пройти расстояние

$$t = \frac{E_c}{L \rho_{Si} u}, \quad (12)$$

Таблица 3

Скейлинговый фактор

Параметр	He, 40 МэВ	Li, 10 МэВ	N, 110 МэВ	C, 65 МэВ
β	1,87	1,83	1,83	1,83

Результаты оценки частоты сбоев

Микросхема	σ , см ²	W_f бит/с	Число сбоев в сутки
MSM512	0,19	822,08	16,90
TDSRAM05	0,22	0,00022	19

где L — линейная передача энергии (Linear Energy Transfer, LET).

Важнейшим параметром оценки состояния микросхемы при попадании ТЗЧ является чувствительный объем. Наличие абстрактной объемной геометрической модели, с которой собирается заряд, высвобождаемый при ионизации носителей в данном чипе, позволяет написать монте-карловские коды для определения скорости одиночных сбоев (CREME96, GEANT4 и др.). В зависимости от выбора формы чувствительного объема получаются конкретные результаты численных расчетов одиночных радиационных эффектов [24, 25].

Если t много меньше толщины чувствительной области (2 мкм для микросхемы), то выбор формы чувствительного объема не играет особой роли для определения вероятности сбоя. Это доказывает правильность выбранного приближения: вероятность сбоя пропорциональна площади прибора [21].

Для определения числа сбоев в единицу времени (W_f) необходимо знать поток ионизирующих частиц N и параметры устройства — площадь ячейки S и объем памяти n_{bit} :

$$W_f = NSn_{\text{bit}} \quad (13)$$

В качестве тестовой модели были рассмотрены микросхемы: MSM512 и TDSRAM05 при плотности потока $10^{-3} \text{ с}^{-1}\text{см}^{-2}$. Результаты вычислений представлены в табл. 4.

Таким образом, представленный алгоритм позволяет достаточно просто проводить оценку вероятности сбоев при воздействии ТЗЧ космического пространства в определенной области физических параметров.

Заключение

Носители, высвобождаемые ионным треком, создают ток, который может вызывать нежелательные эффекты во внешних цепях. Наибольшую опасность представляют одиночные заря-

женные частицы. В работе предложен подход быстрого анализа отказоустойчивости полупроводникового устройства. Рассматриваются физические процессы, протекающие при попадании заряженной частицы в микросхему. Приведена оценка параметров: плотности носителей заряда; толщины чувствительной области; времени сбора заряда. В работе приведено достаточно простое аналитическое выражение для сбора заряда, которое при анализе микросхемы позволяет оценить восприимчивость к одиночным событиям. Также представлено теоретическое прогнозирование вероятностей сбоев некоторых микросхем. Предлагаемый подход позволяет дать относительно быструю оценку отказоустойчивости полупроводникового устройства.

Полученные результаты дают возможность оценить работоспособность электронных устройств в местах, недоступных для солнечного излучения, например, вблизи полюса Луны. В этом случае вследствие затенения от Солнца не будет дозового воздействия, а только воздействие вследствие облучения ТЗЧ галактического происхождения.

Список литературы

1. Binder D., Smith E. C., Holman A. B. Satellite Anomalies from Galactic Cosmic Rays // Nuclear Science, IEEE Transactions on Nuclear Science. 1975. Vol. 22, N. 6. P. 2675—2680.
2. Wallmark J. T., Marcus S. M. Minimum size and maximum packaging density of non-redundant semiconductor devices // Proc. IRE. 1962. Vol. 50. P. 286—298.
3. Adams L. Cosmic ray effects in microelectronics // Microelectronics Journal. 1985. N. 16. Issue 2. P. 17—29.
4. Calin T., Nicolaidis M., Velazco R. Upset Hardened Memory Design for Submicron CMOS Technology // Nuclear Science, IEEE Transactions. 1996. Vol. 43. Issue 6. Part 1. P. 2874—2878.
5. Dutton R. W. and Strojwas A. J. Perspectives on technology and technology-driven CAD // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2000. № 19. P. 1544—1560. Available: <https://doi.org/10.1109/43.898831>
6. Synopsys Inc. Sentaurus Device User Guide. Available: <https://www.synopsys.com/silicon/tcad/device-simulation/sentaurus-device.html>
7. Bortolossi A. 3D finite element drift diffusion simulation of semiconductor devices. Master's thesis. Politecnico di Milano. Milan. Italy. 2014. Available: <https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/94468/3/2014>
8. Potdevin G., Trunk U., Graafsma H. HORUS, an HPAD x-ray detector simulation program // Journal of Instrumentation. 2009. Vol. 4, N. 09. P. 20. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/4/09/P09010>
9. Label C. E., Barnes P. W., Marshall C. J., Marshall A. H. A roadmap for NASA's radiation effects research in emerging microelectronics and photonics // Proc. of the 2000 IEEE Aerospace Conference. P. 535—545.

10. **Maurer R. H., Fraeman M. E., Martin M. N., Roth D. R.** Harsh Environments: Space Radiation Environment, Effects, and Mitigation // Johns Hopkins APL Technical Di. 2008. N. 1. P. 17–29.
11. **Garg R., Khatri S. P.** 3D simulation and analysis of the radiation tolerance of voltage scaled digital circuit // 2009 IEEE International Conference on Computer Design. Lake Tahoe. CA. 2009. P. 498–504.
12. **Larry D.** Edmonds Electric Currents Through Ion Tracks in Silicon Devices // Transactions on nuclear science. 1998. Vol. 45, N. 6. P. 3153–3164.
13. **Dodd P. E., Sexton F. W., Winokur P. S.** Three-dimensional simulation of charge collection and multiple-bit upset in Si devices // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1994. Vol. 41. Issue 6. P. 2005–2017.
14. **Ritchie R. H., Hamm R. N., Turner J. E., Wright H. A.** et al. Physical aspects of charged particle track structure // Nuclear Tracks and Radiation Measurements. 1989. Vol. 16, N. 2/3. P. 141–155.
15. **Танеро К. И., Улимов В. Н., Членов А. М.** Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2018. 304 с.
16. **McLean F. B., Oldham T. R.** Charge funneling in n- and p-type Si substrates // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1982. Vol. 29, N. 6. P. 2018–2023.
17. **Hu C.** Alpha-particle-induced field and enhanced collection of carriers // IEEE Electron Device Letters. 1982. P. 31–34.
18. **Torrens G.** Caldentey Estudio de eventos transitorios inducidos por radiación en memorias SRAM nanométricas: tesis. PhD Ingenieria Electronica Palma de Mallorca. 2012. P. 244.
19. **Fossum J. G., Mertens R. P., Lee D. S., Nijs J. F.** Carrier recombination and lifetime in highly doped silicon // Solid-State Electronics. 1983. Vol. 26. Issue 6. P. 569–576.
20. **Barak J., Adler E., Haran A., Moshe A.** Use of light-ion-induced SEU in devices under reduced bias to evaluate their SEU cross section // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2004. Vol. 51, N. 6. P. 3486–3493.
21. **Александров П. А., Жук В. И., Литвинов В. Л.** Способы построения отказоустойчивых цифровых микросхем и оценки вероятностей их отказа, вызванного облучением. М.: Издательский дом "ПоРог". 2019. 116 с.
22. **Petersen E. L., Shapiro P., Adams J. H.** Calculation of Cosmic Ray Induced Soft Upsets and Scaling // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1982. N. 29. P. 2055.
23. **Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В.** Космическая электроника. В 2-х книгах, книга 2 изд. М.: Техносфера, 2015. 488 с.
24. **Забрев Г. И.** Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. НИЯУ МИФИ, 2010. 148 с.
25. **Согоян А. В., Чумаков А. И., Смолин А. А.** Оценка частоты одиночных радиационных эффектов для современных СБИС // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2018. № 4. С. 170.

P. A. Aleksandrov, Director of the Institute of Information Technologies NRC KI, e-mail: Alexandrov_PA@nrcki.ru, **S. S. Fanchenko**, Head of the Laboratory for X-ray Surface Diagnostics, Institute of Information Technologies NRC KI, e-mail: ssfan@mail.ru, **E. V. Efimenko**, Ph. D. Student, e-mail: el.vl.efimenko@gmail.com, National research centre "Kurchatov institute", Moscow, 123182, Russian Federation

Corresponding author:

Efimenko Elizaveta V., National research centre "Kurchatov institute", Moscow, 123182, Russian Federation, e-mail: el.vl.efimenko@gmail.com

Estimation of the influence of irradiation to heavy charged particles on the operation of a MOSFET

*Received on August 22, 2021
Accepted on September 24, 2021*

A technique for evaluating the fault tolerance of an operating semiconductor device to the influence of heavy charged particles (HCP) of galactic origin is considered. The analysis of the influence of ionizing radiation on the electronic device is carried out.

The physical processes due to heavy charged particle impact are considered, using well known model of an averaged charge funnel. The carriers generated by the ion track create a current resulting in unwanted effects in external circuits. Single charged particles could be regarded as the microcircuit greatest danger. In order to evaluate the susceptibility of a microcircuit to single events, a rather simple analytical expression for charge collection and a simplified expression for the thickness of the sensitive volume are used.

Parameters for two test models (charge carrier density, sensitive volume thickness and charge collection time) are estimated. Calculations have shown, that the local charge carriers density deviation of the order of 10^{22} cm^{-3} , comparable to the atomic concentration, could be achieved.

When an ionizing particle hits the microcircuit, a jump in the current pulse occurs. For an accurate electrical response simulation due to particle propagation the double exponential waveform is used. Charge collection due to drift happens for fractions of a nanosecond, and due to ambipolar diffusion — for nanoseconds

The paper presents the results on voltage surges due to HCP impact with the microcircuits. Analysis of chips produced by two different technologies (0.5 μm and 65 nm) showed higher failure probabilities for an integrated device with the smaller dimensions. As noted earlier, the geometric dimensions of the microcircuit play an important role in the radiation resistance of the system.

Also theoretical failure probability predictions are presented for several microcircuits. The proposed approach allows one to give rather quick fault tolerance estimation of a semiconductor device.

Keywords: single event effects, cosmic rays, heavy charged particle, ambipolar diffusion, charge funneling, radiation effects, scaling factor, depletion layer width, fault tolerance, critical charge

For citation:

Aleksandrov P. A., Fanchenko S. S., Efimenko E. V. Estimation of the influence of irradiation to heavy charged particles on the operation of a MOSFET, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 19–26.

DOI: 10.17587/nmst.24.19-26

References

1. **Binder D., Smith E. C., Holman A. B.** Satellite Anomalies from Galactic Cosmic Rays, *Nuclear Science, IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1975, vol. 22, no. 6, pp. 2675–2680.
2. **Wallmark J. T., Marcus S. M.** Minimum size and maximum packaging density of non-redundant semiconductor devices, *Proc. IRE*, 1962, vol. 50, pp. 286–298.
3. **Adams L.** Cosmic ray effects in microelectronics, *Microelectronics Journal*, 1985, no. 16, issue 2, pp. 17–29.
4. **Calin T., Nicolaidis M., Velazco R.** Upset Hardened Memory Design for Submicron CMOS Technology, *Nuclear Science, IEEE Transactions*, 1996, vol. 43, issue 6, part 1, pp. 2874–2878.
5. **Dutton R. W. and Strojwas A. J.** Perspectives on technology and technology-driven CAD, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2000, no. 19, pp. 1544–1560. Available: <https://doi.org/10.1109/43.898831>
6. **Synopsys Inc.** Sentaurus Device User Guide. Available: <https://www.synopsys.com/silicon/tcad/device-simulation/sentaurus-device.html>
7. **Bortolossi A.** 3D finite element drift diffusion simulation of semiconductor devices. Master's thesis. Politecnico di Milano. Milan. Italy, 2014. Available: <https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/94468/3/2014>
8. **Potdevin G., Trunk U., Graafsma H.** HORUS, an HPAD x-ray detector simulation program, *Journal of Instrumentation*, 2009, vol. 4, no. 09, p. 20. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/4/09/P09010>
9. **Label C. E., Barnes P. W., Marshall C. J., Marshall A. H.** A roadmap for NASA's radiation effects research in emerging microelectronics and photonics, *Proceedings of the 2000 IEEE Aerospace Conference*, pp. 535–545.
10. **Maurer R. H., Fraeman M. E., Martin M. N., Roth D. R.** Harsh Environments: Space Radiation Environment, Effects, and Mitigation, *Johns Hopkins APL Technical Di*, 2008, no. 1, pp. 17–29.
11. **Garg R., Khatri S. P.** 3D simulation and analysis of the radiation tolerance of voltage scaled digital circuit. *2009 IEEE International Conference on Computer Design. Lake Tahoe. CA*, 2009, pp. 498–504.
12. **Larry D.** Edmonds Electric Currents Through Ion Tracks in Silicon Devices, *Transactions on nuclear science*, 1998, vol. 45, no. 6, pp. 3153–3164.
13. **Dodd P. E., Sexton F. W., Winokur P. S.** Three-dimensional simulation of charge collection and multiple-bit upset in Si devices, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1994, vol. 41, issue 6, pp. 2005–2017.
14. **Ritchie R. H., Hamm R. N., Turner J. E., Wright H. A., et al.** Physical aspects of charged particle track structure, *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 1989, vol. 16, no. 2/3, pp. 141–155.
15. **Tapero K. I., Ulimov V. N., Chlenov A. M.** Radiacionnye jeffekty v kremnievyyh integral'nyh shemah kosmicheskogo primeneniya. Moscow, BINOM. Laboratorija znaniy, 2018, 304 p. (in Russian).
16. **McLean F. B., Oldham T. R.** Charge funneling in n- and p-type Si substrates, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1982, vol. 29, no. 6, pp. 2018–2023.
17. **Hu C.** Alpha-particle-induced field and enhanced collection of carriers, *IEEE Electron Device Letters*, 1982, pp. 31–34.
18. **Torrens G.** Caldentey Estudio de eventos transitorios inducidos por radiaci3n en memorias SRAM nanom3tricas: tesis. PhD Ingenier3a Electrynica Palma de Mallorca, 2012, pp. 244.
19. **Fossum J. G., Mertens R. P., Lee D. S., Nijs J. F.** Carrier recombination and lifetime in highly doped silicon, *Solid-State Electronics*, 1983, vol. 26, issue 6, pp. 569–576.
20. **Barak J., Adler E., Haran A., Moshe A.** Use of light-ion-induced SEU in devices under reduced bias to evaluate their SEU cross section, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, vol. 51, no. 6, pp. 3486–3493.
21. **Aleksandrov P. A., Zhuk V. I., Litvinov V. L.** Sposoby postroeniya otkazoustojchivyyh cifrovyyh mikroshem i ochenki veroyatnostej ih otkaza, vyzvannogo oblucheniem, Moscow, Izdatel'skij dom "PoRog", 2019, 116 p. (in Russian).
22. **Petersen E. L., Shapiro P., Adams J. H.** Calculation of Cosmic Ray Induced Soft Upsets and Scaling, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1982, no. 29, p. 2055.
23. **Belous A. I., Soloduha V. A., Shvedov S. V.** Kosmicheskaja jelektronika. V 2-h knigah, kniga 2. Moscow, Tehnosfera, 2015, 488 p. (in Russian).
24. **Zebrev G.** Radiation Effects in Silicon High Scaled Integrated Circuits, NIVaU MIFI, 2010, 148 p. (in Russian).
25. **Sogojan A. V., Chumakov A. I., Smolin A. A.** Ocenka chastoty odinochnyyh radiacionnyh jeffektov dlja sovremennyh SBIS, *Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanojelektronnyh sistem*, 2018, no. 4, 170 p. (in Russian).

М. В. Кулиев, инженер, m.kuliev@mail.ru,
АО "НПП "Пульсар", г. Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ДОЛГОВРЕМЕННУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ СВЧ ГЕНЕРАТОРА

Поступила в редакцию 27.08.2021

Представлены результаты исследования влияния состава гетероструктуры $Ga_xAl_{1-x}N/GaN$ СВЧ транзисторов на долговременную стабильность частоты СВЧ генераторов. Определена связь между параметрами транзисторной структуры и характеристиками СВЧ генераторов на НЕМТ-транзисторах.

Ключевые слова: СВЧ генератор, $AlGaN/GaN/SiC$ -транзисторы, спектральная мощность фазового шума

Как известно, шумы являются фактором, ограничивающим функциональные возможности практически всех радиоэлектронных устройств [1, 2]. Вследствие действия разных физических механизмов частота сигнала на выходе любого реального источника (даже наилучшего качества) непрерывно изменяется во времени. Флуктуации параметров ограничивают как дальность, так и надежность передачи полезного сигнала. В результате старения прибора характеристики случайных флуктуаций частоты могут изменяться после нескольких лет непрерывной работы. Соответствующие флуктуации частоты часто называют "долговременной" нестабильностью.

Для изготовления транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) использовали $Al_xGa_{(1-x)}N$ различных составов ($x = 0,15...0,40$). Флуктуационные процессы, показывающие значение долговременной стабильности частоты в зависимости от содержания Al в гетероструктуре, оценивали с помощью спектральной плотности мощности шума параметров сигнала.

Изначально исследования характеристик генераторов рассчитывали теоретически с применением сложных статистических параметров [2]. С появлением новых измерительных устройств расчетные характеристики стали подтверждать и экспериментально.

На АО "НПП "Пульсар" предложен метод измерения уровня спектральной плотности мощности фазового шума по $C-V$ -характеристикам [3].

Метод измерения $C-V$ -характеристик дает возможность получать следующую информацию: о значении заряда в канале; о наличии положительного или отрицательного заряда в барьерном слое; о концентрации свободных но-

сителей в канальном слое; о процессе формирования двумерного газа, что крайне важно для понимания механизма таких явлений, как коллапс тока, появление низкочастотных шумов, генерируемых случайными флуктуациями тока, причиной которых являются дефекты в полупроводниковых материалах, это в свою очередь позволяет оценить процессы старения приборов.

Для изучения влияния количества Al в составе гетероструктуры на долговременную стабильность частоты анализировали кристаллы мощных шестипальцевых $AlGaN/GaN/SiC$ -транзисторов X -диапазона с длиной затвора 0,25 мкм, изготовленных на гетероструктурах $Al_xGa_{(1-x)}N/GaN$ различных составов, выращенных с применением MOCVD-технологии на подложках SiC с ориентацией (0001). Вольт-фарадные характеристики барьеров Шоттки систем затвор — сток и затвор — исток измеряли в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц на установке CSM/WIN System при планарном расположении измерительных золотых зондов на контактных окнах транзисторов. Емкостные зависимости снимали по последовательной схеме замещения. Спектральную плотность мощности фазового шума (ФШ) измеряли в составе СВЧ генератора, стабилизированного резонатором.

Емкостные параметры исследуемых транзисторов показали связь со спектральной плотностью мощности фазовых шумов СВЧ генераторов (рис. 1, 2). У большинства анализируемых кристаллов $C-V$ -характеристики в области перехода от обогащения к обеднению показывали характерный пик, высота которого возрастала с уменьшением частоты измерения [3]. Разнообразие форм $C-V$ -характеристик кристаллов с разным содержанием Al в гетероструктуре сви-

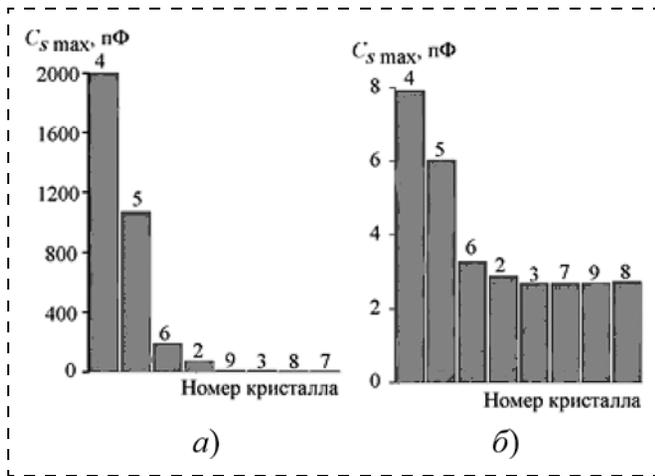


Рис. 1. Распределение высоты пика емкости $C_{s \max}$ на $C-V$ -характеристиках по выборке при частотах f :
 а — 10 кГц; б — 200 кГц

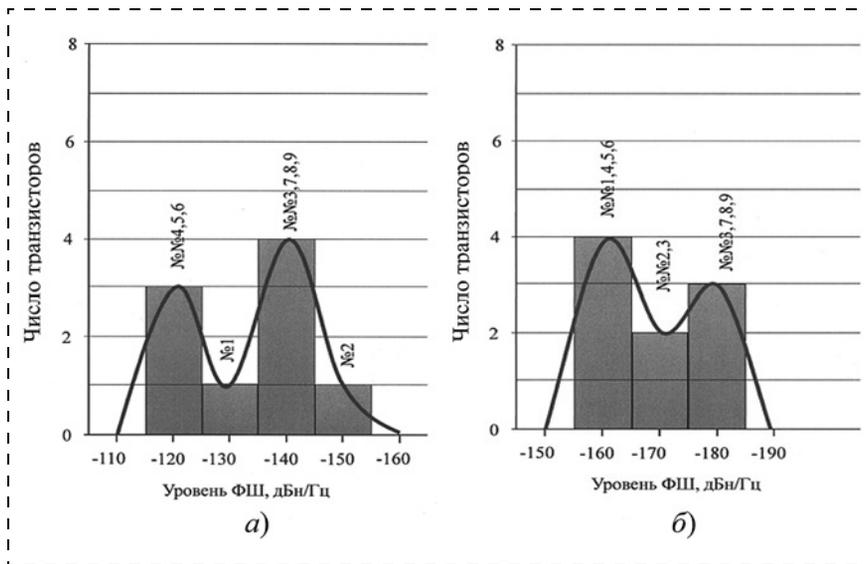


Рис. 2. Уровни фазовых шумов СВЧ генератора с анализируемыми транзисторами в качестве активного элемента при отстройке:
 а — 10 кГц; б — 200 кГц

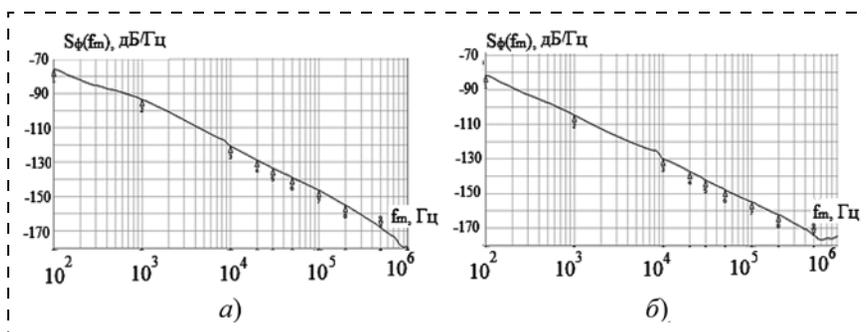


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности фазового шума СВЧ генератора (S_ϕ) в диапазоне частот СВЧ генератора (f_m) от концентрации содержания алюминия в гетероструктуре $Ga_xAl_{1-x}N/GaN$, на которой изготовлен СВЧ транзистор:
 а — содержание Al 30 %; б — содержание Al 20 %

детельствует о различной природе дефектов в структуре, также ответственных за возникновение низкочастотных шумов.

Измерения характеристик кристаллов в составе СВЧ генератора показали различный ход зависимости спектральной плотности мощности фазового шума $S_\phi(f_m)$ у разных кристаллов различных составов (рис. 2). Распределение результатов измерения уровня $S_\phi(f_m)$ для СВЧ генератора по выборке при одной и той же частоте отстройки 10 и 200 кГц показывает, как минимальный, так и максимальный уровень $S_\phi(f_m)$ в зависимости от содержания Al в гетероструктуре.

Причиной появления такой нестабильности емкости является наличие в барьерном слое или на его границах дефектов, которые могут проявляться как глубокие ловушечные центры.

Временная постоянная дефектов такова, что они возникают на низких частотах измерения, формируя заряд, обеспечивающий приращение емкости. Наблюдаемый спад емкости в пике при возрастании обеднения связан с перераспределением напряжения между каналом и барьерным слоем. По мере возрастания обедняющего напряжения (по абсолютной величине) происходит обеднение канала свободными носителями и, как следствие, уменьшение дополнительного заряда. В состоянии "включено" горячие электроны из канала получают достаточную энергию для преодоления энергетического барьера, который существует во внешней области AlGaIn/GaN HEMT и попадают в ловушки на поверхности или внутри самого барьера AlGaIn [5]. По наблюдениям авторов [5] процесс захвата электронов в ловушки имеет медленный характер и, как правило, длительное время восстановления. Кроме того, эффекты захвата усиливаются после деградации прибора [4].

Исследования, выполненные в работе, показали, что чем выше мольная доля Al в эпитаксиальном слое $Ga_xAl_{1-x}N$ СВЧ

транзистора, на котором изготовлен СВЧ генератор, тем выше уровень фазового шума СВЧ генератора (рис. 3).

Причиной возрастания уровня фазового шума при увеличении мольной доли Al является рост пьезоэлектрических напряжений, приводящий к увеличению плотности энергетических состояний.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующее заключение: снижение мольной доли алюминия с 30 до 20 % в гетероструктуре AlGa_xN/GaN СВЧ HEMT-транзистора, на котором изготовлен СВЧ генератор, позволяет уменьшить уровень фазового шума за счет снижения плотности энергетических состояний образованных пьезоэлектрических напряжений на границе Al_xGa_(1-x)N/GaN. Это позволяет уменьшить интенсивность старения HEMT и увеличить долговременную стабильность частоты СВЧ генераторов.

Список литературы

1. Кулиев М. В. Факторы, влияющие на долговременную стабильность СВЧ генераторов для РЭА космического базирования // Электронная техника. Сер. 2 Полупроводниковые приборы. 2020. № 3 (258). С. 77–81.
2. Рютман Ж. Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высокостабильных генераторов: Итоги развития за пятнадцать лет // ТИИЭР. 1978. Т. 66, № 9. С. 70–102.
3. Колковский Ю. В., Енишерлова К. Л., Давыдов Н. В. и др. Низкочастотные фазовые шумы и некоторые емкостные параметры AlGa_xN/GaN HEMT-транзисторов // Электронная техника. Сер. 2 Полупроводниковые приборы. 2019. № 2 (253). С. 4–29.
4. Кулиев М. В., Актин В. Е., Зиневич В. С., Давыдов Н. В. Формирователь СВЧ сигналов с малыми фазовыми шумами для бортовой РЛС // Материалы XV научно-технической конференции "Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА", г. Москва, 27–29 сентября 2017 г. С. 293–296.
5. Енишерлова К. Л., Колковский Ю. В., Боброва Е. А. и др. Влияние дефектов с глубокими уровнями на C-V-характеристики мощных AlGa_xN/GaN/SiC HEMT // Микроэлектроника. 2019. Т. 48, № 1. С. 47–55.

M. V. Kuliev, m.kuliev@mail.ru
JSC "NPP "Pulsar", Moscow, Russian Federation

Corresponding author:

Kuliev Murad V., Engineer, JSC "NPP "Pulsar", Moscow, Russian Federation. E-mail: Engem.kuliev@mail.ru

Influence of the Heterostructure Composition on the Long-Term Stability of a Microwave Oscillator

Received on August 27, 2021

Accepted on September 13, 2021

In this work, we investigated the influence of the composition of the Ga_xAl_{1-x}N/GaN microwave transistor heterostructure on the long-term frequency stability of microwave generators. The relationship between the parameters of the transistor structure and the characteristics of microwave generators based on HEMT transistors is determined.

Keywords: microwave generator, AlGa_xN/GaN/SiC-transistors, phase noise spectral power

For citation:

Kuliev M. V. Influence of the Heterostructure Composition on the Long-Term Stability of a Microwave Oscillator, *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 27–29.

DOI: 10.17587/nmst.24.27-29

References

1. Kuliev M. V. Factors affecting the long-term stability of microwave generators for space-based radioelectronic devices, *Journal of Electronic Engineering. Ser.2 Semiconductor devices*, 2020, no. 3 (258), pp. 77–81 (in Russian).
2. Rytman J. Characteristics of phase and frequency instability of signals of highly stable generators: Development results over fifteen years, *TIIEP*, 1978, vol. 66, no. 9, pp. 70–102 (in Russian).
3. Kolkovsky Yu. V., Enisherlova K. L., Davydov N. V. Low-frequency phase noise and some capacitive parameters of AlGa_xN /

GaN HEMT-transistors, *Electronic engineering. Series 2 Semiconductor devices*, Issue 2 (253), 2019, pp. 4–29 (in Russian).

4. Kuliev M. V., Aktin V. E., Zinevich B. S., Davydov N. V. et al. Microwave signal generator with low phase noise for airborne radar, *Materials of the XV scientific and technical conference "Solid-state electronics. Complex functional blocks of REA"*, Moscow, September 27–29, 2017, pp. 293–296 (in Russian).

5. Enisherlova K. L., Kolkovsky Yu. V., Bobrova E. A. et al. Influence of defects with deep levels on C-V characteristics of powerful AlGa_xN/GaN/SiC HEMT, *Microelectronics*, 2019, vol. 48, no. 1, pp. 47–55 (in Russian).

СИСТЕМА В КОРПУСЕ SYSTEM IN PACKAGE

УДК 621.396

DOI: 10.17587/nmst.24.30-50

А. П. Лисицкий¹, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., liant222@yandex.ru,
П. П. Мальцев, д-р техн. наук, научный рук.¹, зав. лаб.², isvch@isvch.ru,
О. С. Матвеев^{1,2}, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., unicfive@yandex.ru,
А. О. Михалев, мл. науч. сотр.¹, инженер², m2lkeny@yandex.ru,
В. Р. Скрынский², ассистент, vlad_ckr@mail.ru

¹ Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Москва

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА — Российский технологический университет" (РТУ МИРЭА), Москва

МЕТОДЫ СБОРКИ "СИСТЕМА-В-КОРПУСЕ" В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН: СТРУКТУРЫ И МАТЕРИАЛЫ. ОБЗОР

Поступила в редакцию 10.01.2022

В обзоре приведена классификация строения СВЧ плат (интерпозеров) для "системы-в-корпусе" в миллиметровом диапазоне длин волн, проведен анализ достижимых рабочих частот для различных диэлектрических материалов.

Ключевые слова: система в корпусе, плата интерпозер, антенна, сверхвысокочастотная монолитная интегральная схема, конструкторско-технологический базис, миллиметровый диапазон длин волн

С ростом рабочих частот СВЧ устройств размеры антенн стали сравнимы с размерами СВЧ микросхем (СВЧ МИС), что позволило размещать всю СВЧ часть устройства в отдельной сборке или плате. Такая сборка совместно с цепями питания, передачи сигналов и управления именуется "система-в-корпусе" (СвК), *system-in-package (SiP)*, *system on package (SoP)*.

Технология гибридной сборки СВЧ микросхем проволочными соединениями (*wire bonds*) позволяет монтировать антенну, выполненную в виде отдельного чипа на общую плату. Примером является соединение СВЧ МИС с одной антенной (рис. 1) [1]. Сборка имеет размеры 7×11 мм. Дипольная антенна имеет размеры $0,5 \times 1,4$ мм.

Технологии сборки данной СвК описаны в работе [2]. Такая сборка может быть дополнена МИС управления, модуляции и демодуляции.

Компоновка СвК вида, показанного на рис. 1, требует малых потерь при прохождении излучаемого сигнала через верхнюю крышку. Пример разработки и сборки СВЧ МИС с антеннами на кристалле в радиопрозрачном корпусе для V-диапазона приведен в работе [3]. Передающая и приемные антенны выполнены монолитно на микросхеме приемо-передатчика, (вид смонтированного проволочной микросваркой чипа показан на рис. 2). Вертикальные стенки корпуса выполнены из жидкокристаллического полимера (Liquid Crystal Polymer (LCP), крышка — из

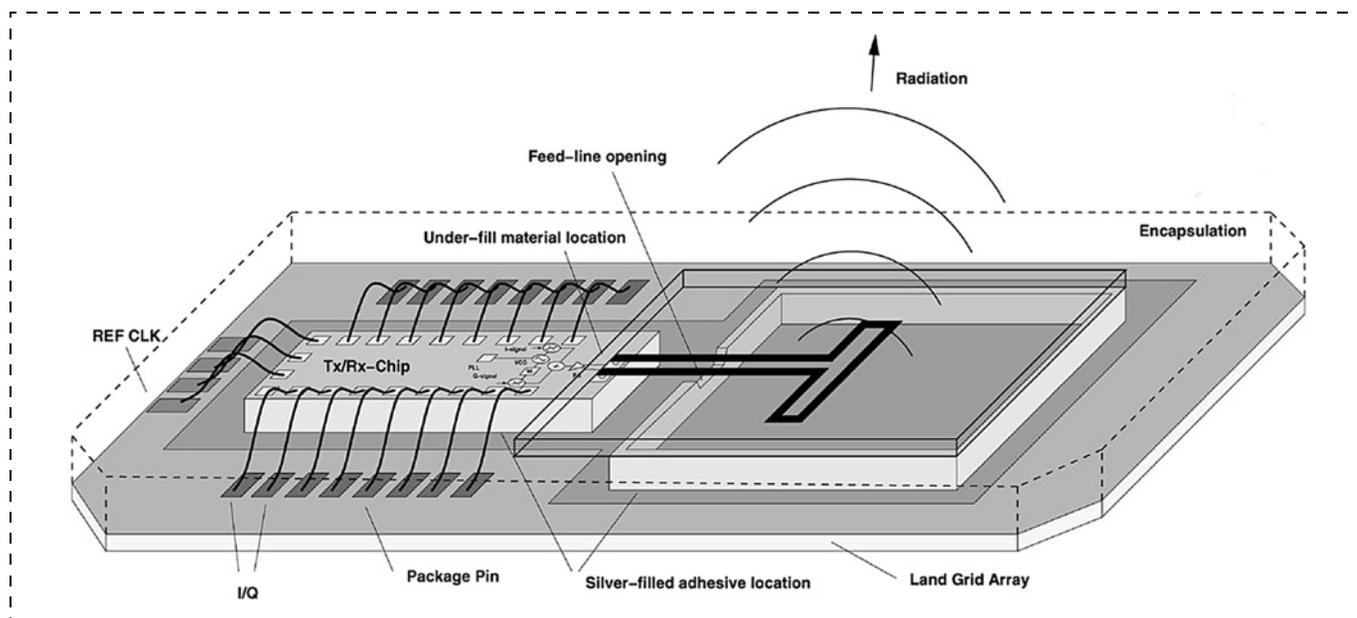


Рис. 1. Общий вид СвК [2]

материала RT-Duroid 5880, для повышения направленности над чипом на крышке расположены пассивные монополи над передающей (TX) и приемной (RX) антеннами (рис. 3).

Гибридная сборка МИС (рис. 4) и антенны с одним слоем металлизации диапазона 154 ГГц, сформированной из слоев кремния (рис. 5), описана в работе [4]. Для снижения потерь в области монополя кремниевая подложка удалена, металлизация антенны нанесена на тонкий слой нитрида кремния (Si_3N_4).

Передатчик диапазона 42...46 ГГц (рис. 6, а, см. четвертую сторону обложки) с антеннами-вибраторами реализован по гибридной технологии с использованием подложки из трех слоев материала Rogers RT6002 (рис. 6, б, см. четвертую сторону обложки) [5]. Соединение антенн и чипа выполнено ленточными проводниками.

Примером фазированной антенной решетки (ФАР) в составе СвК является разработка, показанная рис. 7 [6]. СвК образован верхней платой АР и нижней платой с СВЧ МИС, соединенной проволочной разваркой. Обе платы соединяются шариковыми выводами. ФАР занимает верхнюю плоскость СвК размерами $13,5 \times 8$ мм и имеет полосу частот 57,5...62,5 ГГц.

Использование миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов для перспективных систем связи 5G и систем автомобильной локации стимулировало многочисленные разработки методов массового производства (*high volume production*) компактных микросборок, включающих

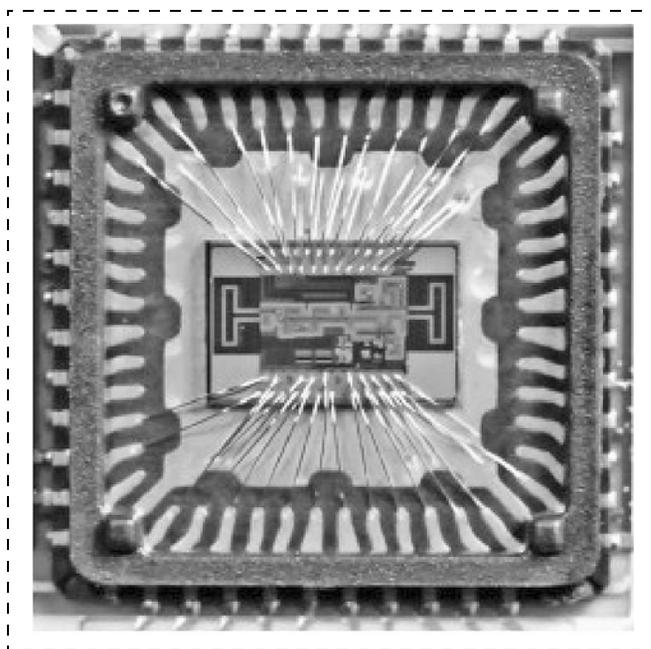


Рис. 2. МИС с антеннами на кристалле в корпусе

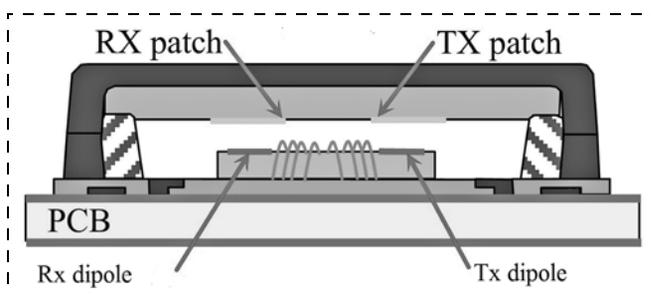


Рис. 3. Сечение СвК в сборе

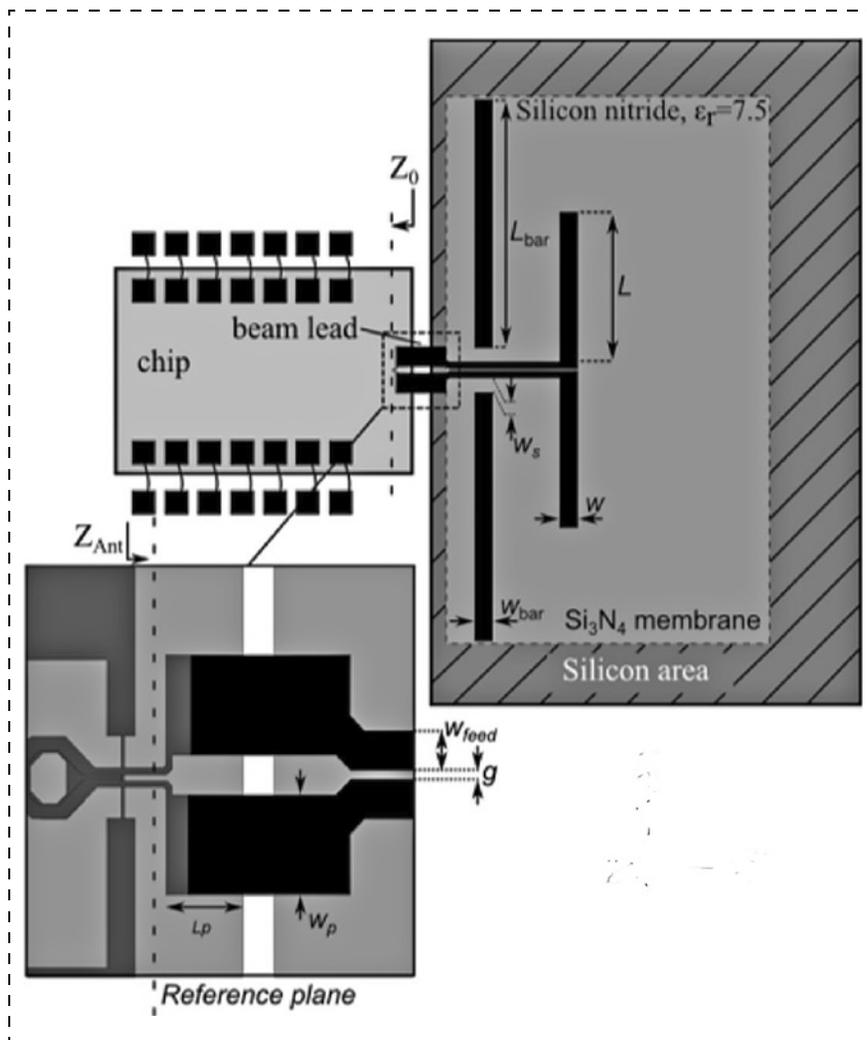


Рис. 4. Соединение антенны и чипа

СВЧ МИС, антенны, классифицируемые как "система в корпусе" (СвК). Эти методы актуальны также для космической и авиационной электроники, для нового поколения средств вооружений. 3D-компоновка, используемая для цифровых микросхем, при которой микросхемы расположены в несколько слоев с вертикальными соединениями, не решает всей совокупности проблем компактной сборки СВЧ СвК в силу ряда особенностей. СВЧ техника может использовать диапазон частот более 100 ГГц, предъявляет более строгие требования к импедансам соединительных линий (следовательно, к топологии их проводников). СВЧ МИС имеют индивидуальные размеры и координаты контактных площадок. Кроме того, реализация антенны в составе микросборки (*antennas-in-package (AiP)*) может требовать многослойной структуры с диэлектриком значительных размеров и толщины. Эти соображения выделили проблему интегра-

ции СВЧ МИС с антеннами в отдельное направление, что подтверждает, в частности, издание книг по данной тематике и ежегодные конференции [7–12]. Обзоры содержат описания многочисленных реализаций СвК [13–20]. Перечисленные публикации уделяют недостаточно внимания классификации строения СВЧ СвК и анализу частотных возможностей применяемых диэлектриков.

Агентство DARPA (США) реализовало ряд программ развивающих методы сборки МИС. Программа "Diverse Accessible Heterogeneous Integration (DAHI) program" (программа гетерогенной интеграции) (2013–2017 г.), предусматривает сборку СвК из МИС различных материалов (пример реализации технологии "Northrop Grumman Diverse Accessible Heterogeneous Integration (DAHI) process", пример которой представлен на рис. 8). [21]. Анализ программ DARPA в области монтажа МИС проведен в обзоре [22].

Перспективные методы сборки СвК обозначают терминами *Fan-out Wafer Level Packaging (FOWLP)*, *Fan-out Panel Level Packaging (FOPLP)* или *wafer-level packaging (WLP)*, смысл которых: "корпусирование при проводниках размеров чипа". Применяется также обозначение "*ball grid array (eWLB) package*" — корпусирование на основе шариковых выводов. Используют три основных типа FOWLP плат:



Рис. 5. Сечение антенны (экранирующий проводник не показан)

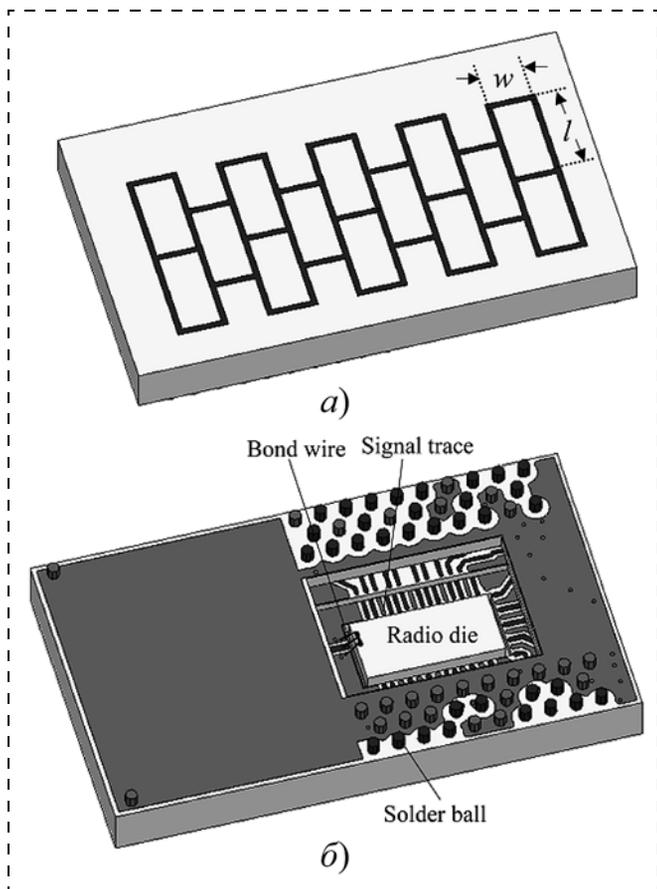


Рис. 7. Платы СВЧ:

а — плата ФАР; б — плата с СВЧ МИС

- плата с фиксацией СВЧ МИС на ней шариковым монтажом или термокомпрессией контактных площадок (тип 1) (Flip-chip ball grid array (FCBGA) package, Flip chip chip scale package (FCCSP));

- корпусирование с погружением чипа в плату (embedded wafer level packaging (EMWLP) technology) с вариантами: создание платы путем заливки СВЧ МИС компаундом (тип 2); фиксация СВЧ МИС в полостях платы (тип 3). Для случая погружения МИС в стеклянную плату используется термин "embedded glass fan out (eGFO) technology", "eGFO package", "through glass vias (TGV) technology".

Плата СВЧ диапазона трех указанных типов, в которой соединяются или в которую монтируют СВЧ МИС, содержит разводку (*fan out*), т. е. СВЧ соединения, и называется "интерпозер" (*interposer*). Интерпозер, в свою очередь, можно монтировать на "общую" печатную плату, как правило, шариковыми соединениями *ball-grid array (BGA)* или термокомпрессией (*gold thermo-compression bond*). В то же время некоторые авторы плату, по которой распространяются СВЧ сигналы, называют традиционно "печатная плата (PCB)" и многослойная плата (*multilayer board (MLB)*). Разводку СВЧ сигналов выполняют в интерпозере всех указанных типов напылением необходимого числа проводящих слоев с промежуточными диэлектрическими слоями. Металлизация разводки СВЧ сигналов имеет обозначение "распределяющие слои" (*redistribution layer (RDL)*). Интерпозер соединяет СВЧ часть устройства в единую сборку и является важнейшей частью СВК, определяющей ее характеристики.

Пример FOWLP-платы с интерпозером типа 1 с монтируемыми чипами антеннами-диполями для Ка-диапазона (25,1...36 ГГц) показан на рис. 9 [23]. Диэлектрик антенны — эпоксидный

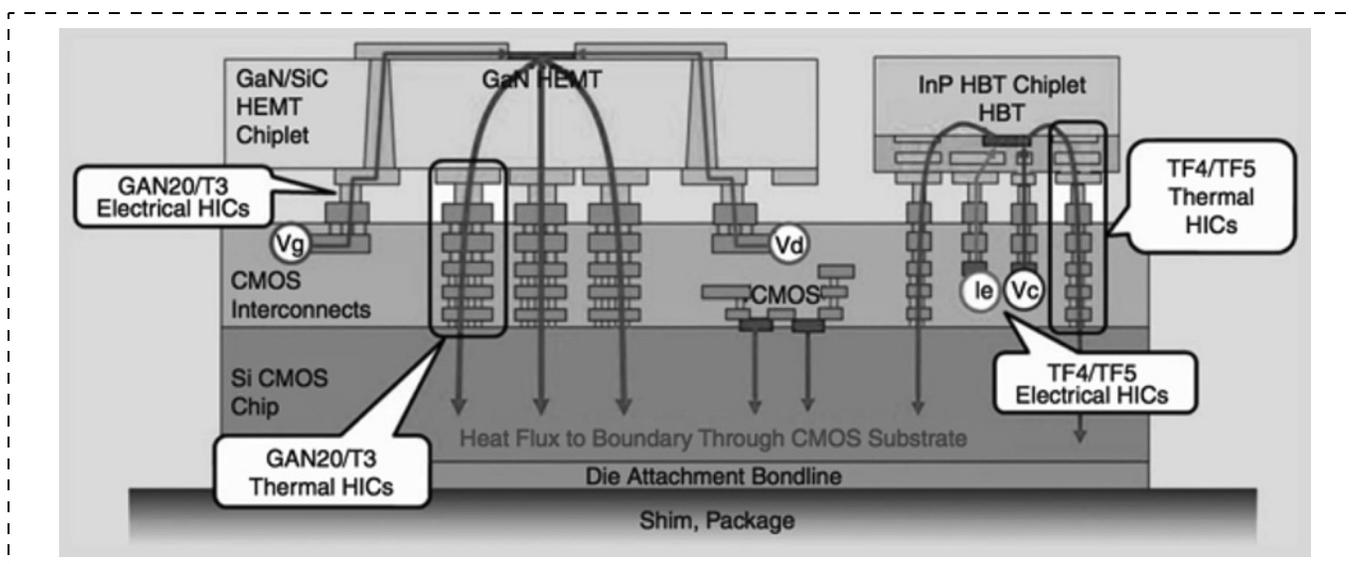


Рис. 8. Сечение СВК по технологии ДАН

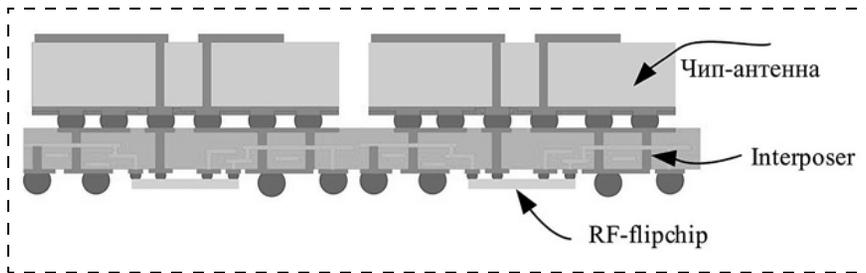


Рис. 9. Сечение интерпозера типа 1 с чипами антеннами

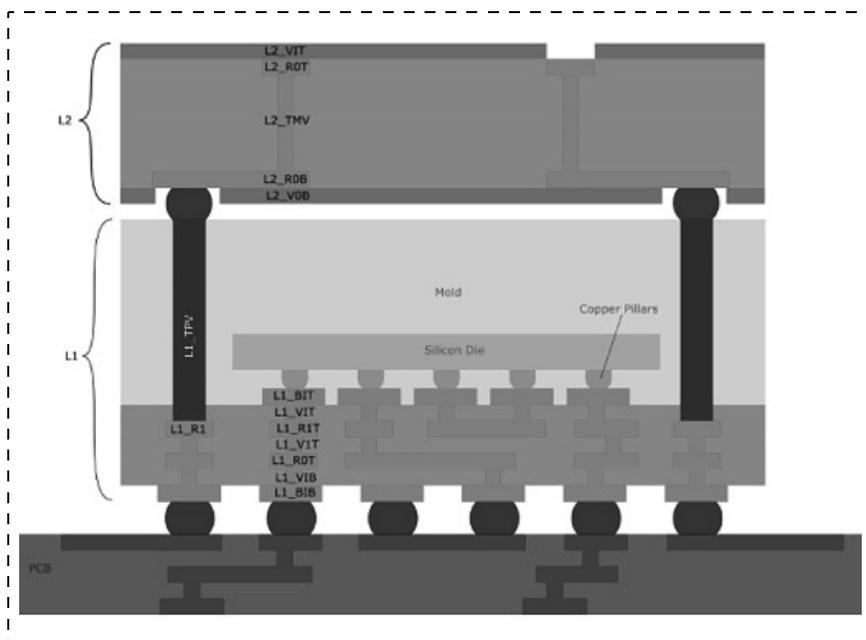


Рис. 11. Сечение интерпозера типа 2 с монтируемой антенной

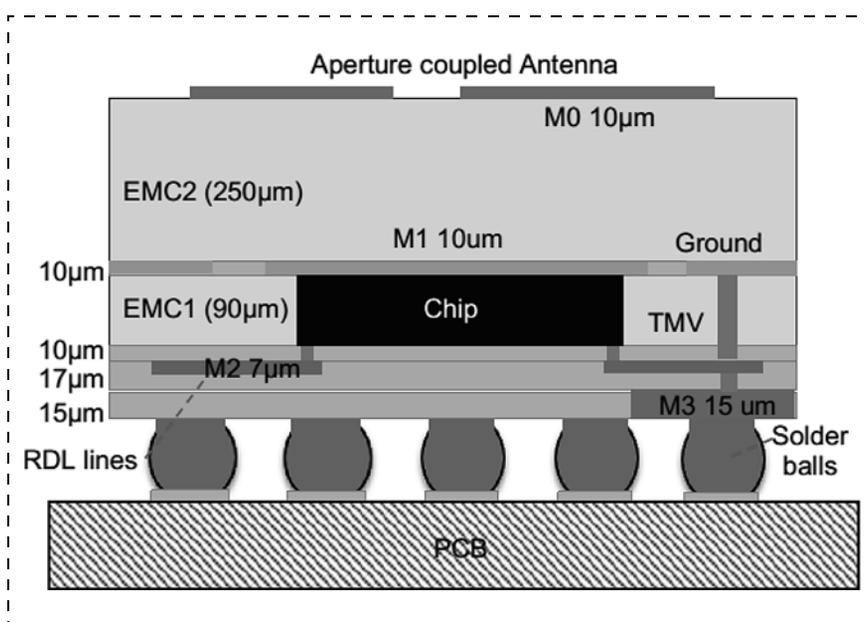


Рис. 12. Сечение интерпозера типа 2 с монолитной антенной

ламинат со стекловолокном FR-4 (*glass-reinforced epoxy laminate*) толщиной 1,4 мм, интерпозер — слой ламината.

Пример интерпозера типа 1 в полном составе описан в работе [24]. AP 8×8 с двойной поляризацией (сигналы H-port, V-port) Ka-диапазона (24,25...29,5 ГГц) образована микросборкой из интерпозера, к которому снизу присоединены МИС (RFIC) с теплоотводом, сверху — многослойная плата излучателя. Сечение интерпозера показано на рис. 10 (см. четвертую сторону обложки).

Концепция интерпозера типа 2 предусматривает погружение (заливку, *mold*) СВЧ МИС в компаунд. При этом формируется механически прочная плата, в которой выполнена сквозная металлизация и слои RDL с одной или обеих сторон. Пример реализации для частоты 60 ГГц с монтируемой антенной представлен в работе [25] (рис. 11). Возможно также монолитное исполнение антенны в составе платы интерпозера, показанное на рис. 12 [26].

Пример интерпозера типа 3 представлен в работе [27]. СВЧ МИС зафиксированы в полостях стеклянной платы (*glass*), выполнены верхний и нижний RDL, антенны интегрированы в верхний RDL, как показано на рис. 13.

Запатентована общая структура СВЧ с несколькими платами (рис. 14) [28].

Антенна может быть выполнена в составе интерпозера типа 1, как показано на рис. 15, для многослойной сборки V-диапазона [29]. Использованы препреги из эпоксидного ламината FR-4.

Возможно большое число вариантов структур FOWLP-сборки. Так, в обзоре [14] приведе-

ны следующие варианты реализации компоновки СВК:

- многослойная плата антенны (PCB) размещена на интерпозере, на который с другой стороны в один слой монтируют СВЧ МИС (рис. 16, а);
- интерпозер, на который монтируют СВЧ МИС, включает антенну (рис. 16, б);
- антенна выполнена как слой металлизации СВЧ МИС или как отдельный чип (рис. 16, в);
- антенна интегрирована в интерпозер типа 1, к которому снизу монтируют СВЧ МИС (рис. 16, з);
- антенны выполнены как металлизация интерпозера типа 2 (рис. 16, д).

Для обеспечения теплоотвода от усилителей мощности СВЧ МИС требуется монтировать источник теплоты (МИС) на металлическом радиаторе. Варианты компоновки СВК типа 1 представлены на рис. 17 [17].

На рис. 18 [30] приведена реализация структуры вида, показанного на рис. 17, а.

Предлагается масштабируемая технология интерпозера для фазированных решеток (ФАР) W-диапазона (Scalable Phased Array Radio Transceiver Architecture (SPARTA)). Основа ФАР — плата с 11 слоями металлизации из органического препрега, в которой теплоотвод реализован частыми столбиками межслойной металлизации (рис. 19) [31].

В составе усилителя мощности (УМ) необходимы конденсаторы в цепи питания, которые ввиду большой емкости выполняют отдельными компонентами (*integrated passive device (IPD), capacitors*). Компактная конструкция сборки усилителя мощности (рис. 20) описана в работе [32]. СВЧ МИС и IPD монтируют в отверстия в медной плате и фиксируют компаундом (EMC).

Теплоотвод обеспечивается медным слоем — радиатором Cu/Ni/Au.

Структура интерпозера для сборки МИС, в которой МИС и конденсаторы погружены в медь, показана на рис. 21 [33]. Такая структура

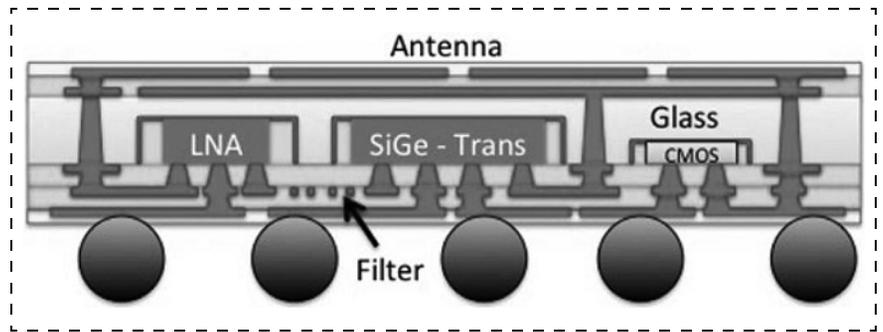


Рис. 13. Сечение интерпозера типа 3 с монолитной антенной

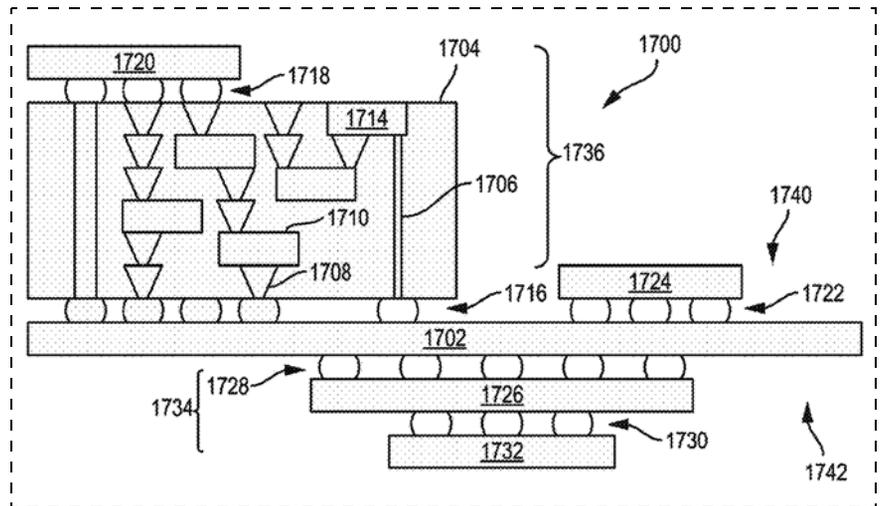


Рис. 14. Сечение СВК типа 1:

1700 — сборка (*assembly*), 1702 — плата (*circuit board*); 1704 — интерпозер; 1720, 1724, 1732 — МИС; 1734 — сборка в сборе (*package-on-package structure*)

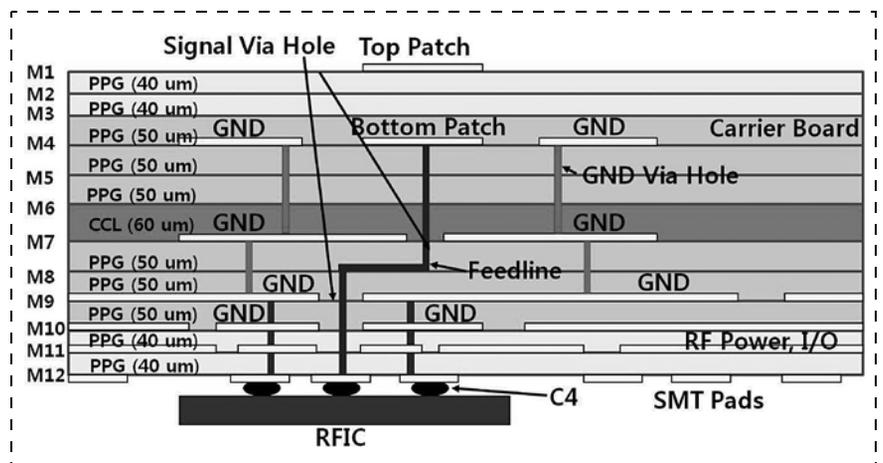


Рис. 15. Сечение интерпозера с антенной

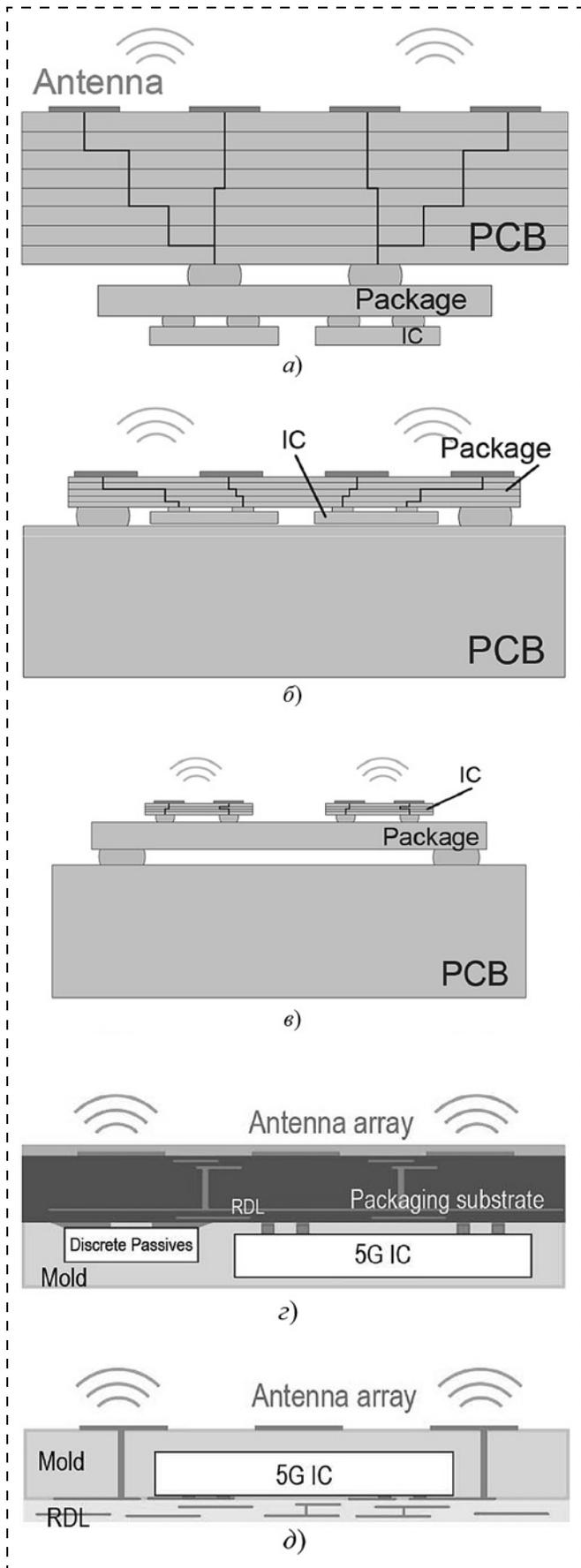


Рис. 16. Варианты размещения антенны в составе СвК

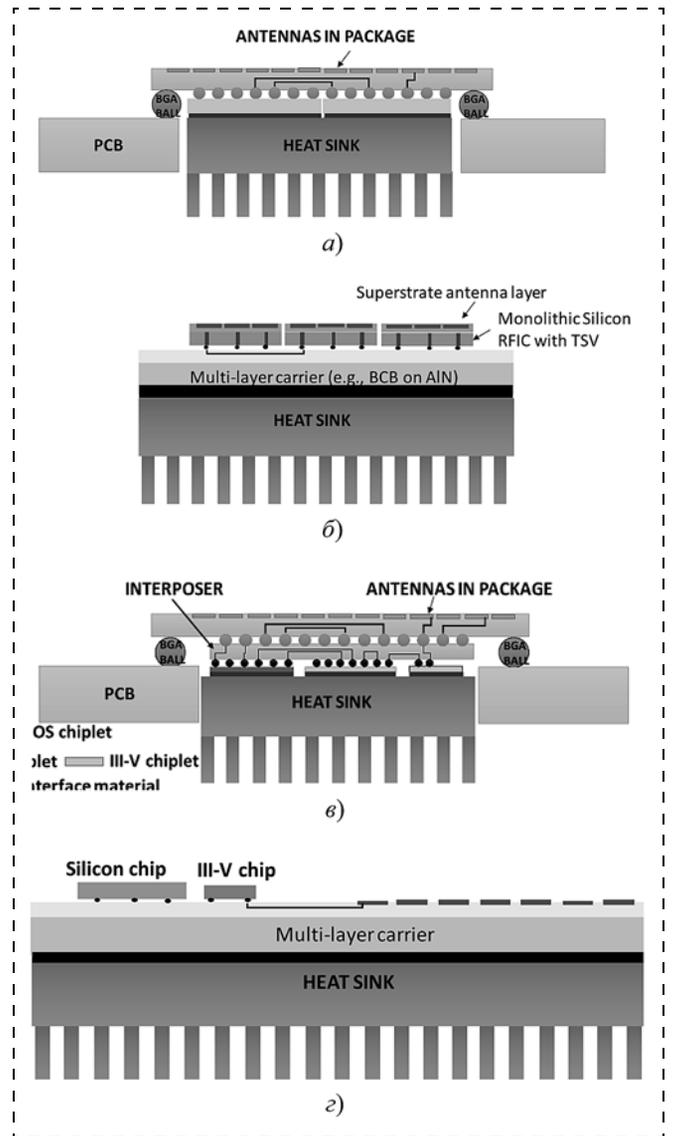


Рис. 17. Варианты обеспечения теплоотвода

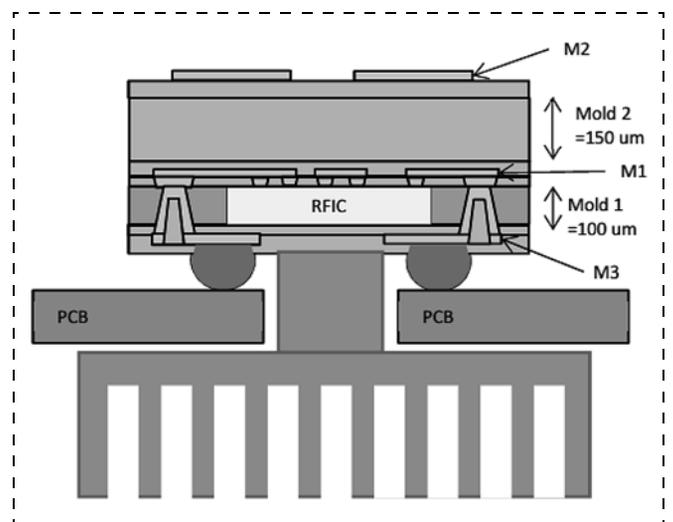


Рис. 18. Реализация теплоотвода для интеропера типа 2

создается технологическим процессом "metal-embedded chip assembly (MECA) process": МИС и чипы конденсаторов фиксируют на временной плате, на эту плату опускают кремниевую пластину с отверстиями для МИС УМ и конденсаторов, зазоры между чипами и кремниевой пластиной гальванически заполняют медью. Создается компактная плата УМ (рис. 22).

Использование для фазированной антенной решетки (ФАР) FOWLP- и EMWLP-технологии позволяет изготовить антенное поле с необходимыми СВЧ трактами групповой технологией в виде монолитной конструкции (интеграция уровня панели, Panel Level Packaging), что существенно снижает массу и стоимость ФАР. Разработана фазированная антенная решетка из 1024 излучателей круговой поляризации с управлением фазой для SATCOM терминала Ka-диапазона в виде монолитной платы размером 210×160 мм [34]. Каждые четыре соседних излучателя получают по два независимых сигнала ортогональной поляризации (*left-hand circular polarization (LHCP) and right-hand circular polarization (RHCP)*) от СВЧ МИС восьмиканальный формирователь сигналов четырех излучателей (сокращенно ВКФС, 8-channel beamformer) (рис. 23). ВКФС содержит восемь фазовращателей и восемь усилителей мощности, кроме того, предусмотрены предварительные усилители мощности (*driven amplifier*), с которых синфазные сигналы поступают на каждую пару ВКФС. Таким образом, плата содержит 256 СВЧ МИС ВКФС и 128 СВЧ МИС предварительных усилителей мощности. Плата, сечение которой показано на рис. 24, сформирована из ламин-

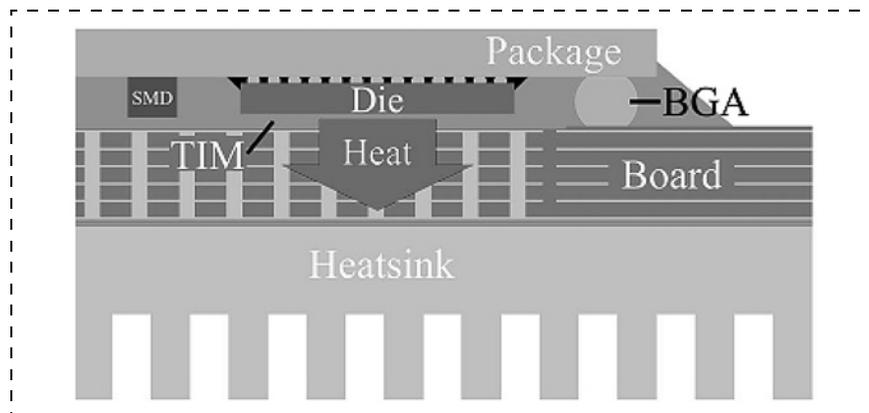


Рис. 19. Реализация теплоотвода столбиками межслойной металлизации

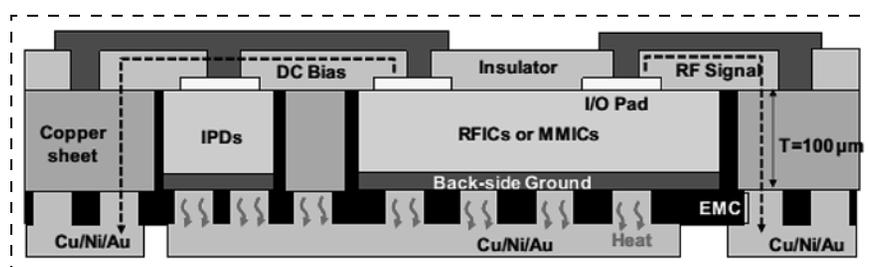


Рис. 20. Плата СВЧ УМ с теплоотводом

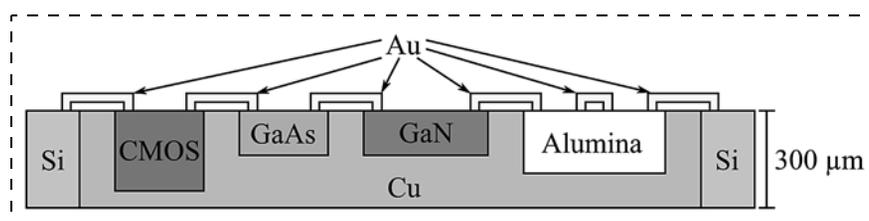


Рис. 21. Сечение платы УМ

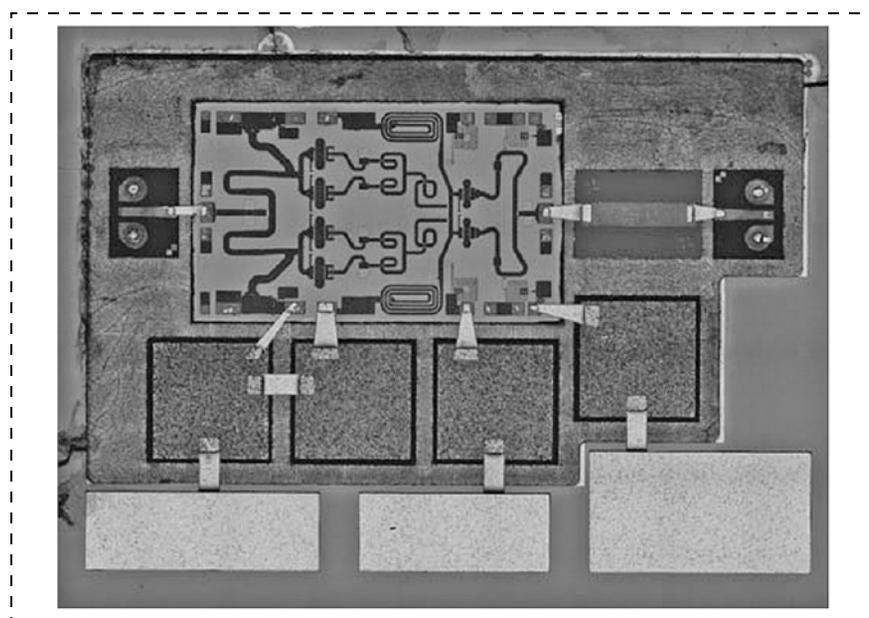


Рис. 22. Топология платы УМ

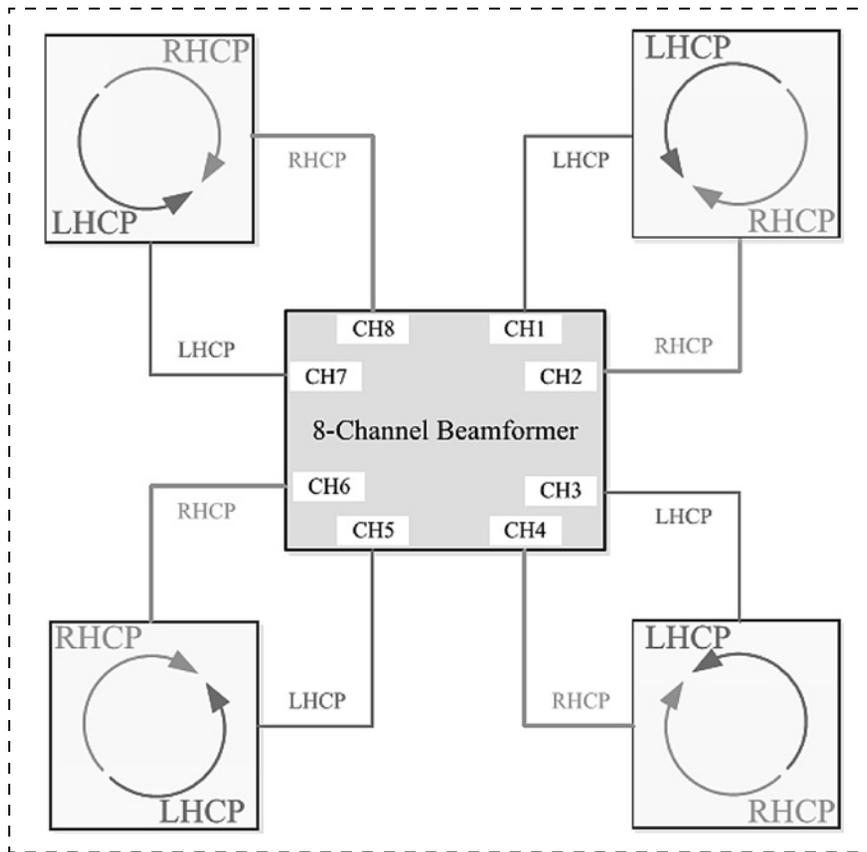


Рис. 23. Схема соединения восьмиканального формирователя сигналов и четырех излучателей

ната Panasonic Megtron-6. СВЧ соединения содержат последовательные шлейфы (*match circuit*) вблизи от вертикальных переходов для улучшения согласования (рис. 25).

Создана ФАР размером 500×500 мм из сборок типа $2 \times 12 \times 90$, смонтированных на общей плате шариковыми выводами. Каждая сборка содержит четыре СВЧ МИС [35].

Так как интерпозеры СВЧ диапазона имеют высокую стоимость (*high cost module*), предложено их формировать с минимальной площадью, а общую плату ФАР выполнять из более дешевого материала (*low cost hybrid stacked main board*) и СВЧ сигнал передавать через коаксиальные соединения (*coaxial RTH*) в этой плате (рис. 26) [36].

Ряд публикаций описывает реализацию интерпозера типа 2, т. е. с заливкой СВЧ МИС компаундом, с однослойной RDL

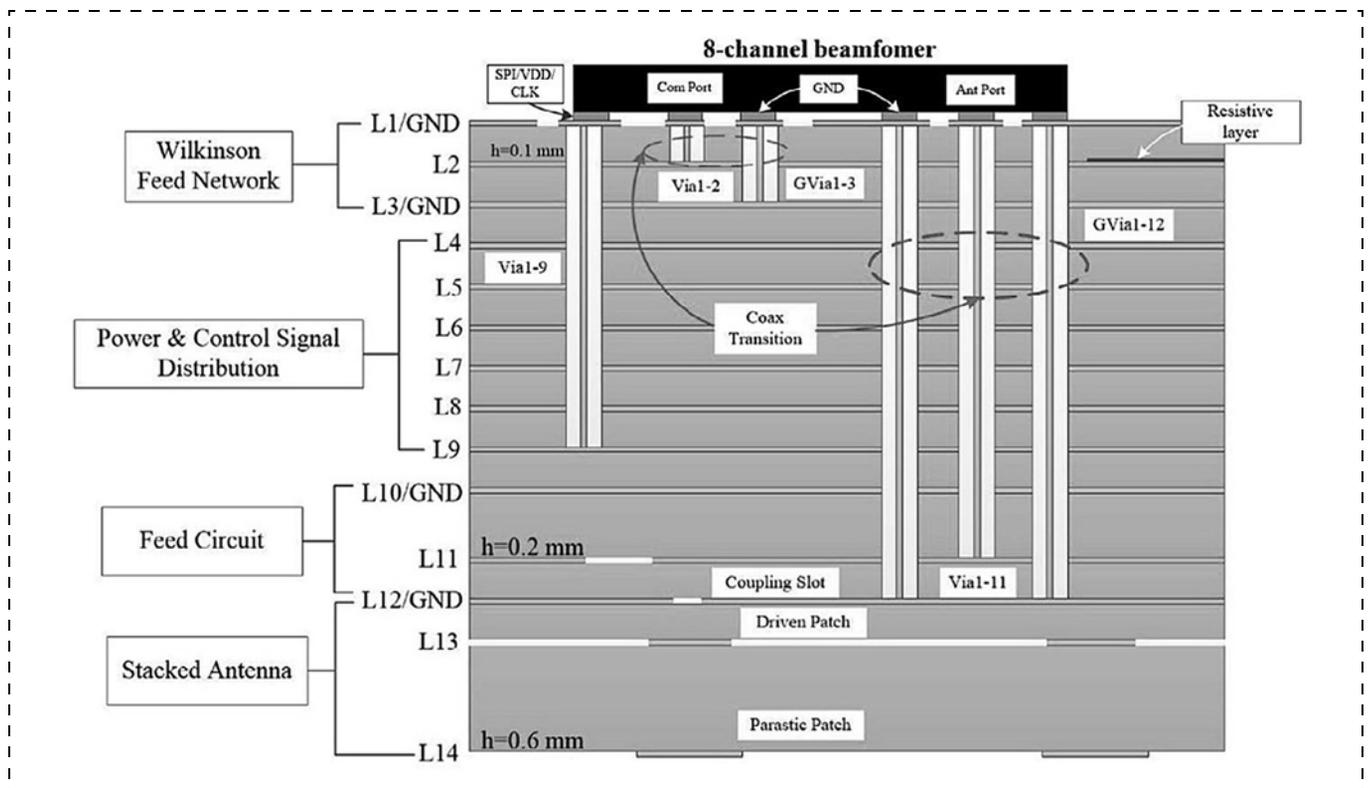


Рис. 24. Сечение платы

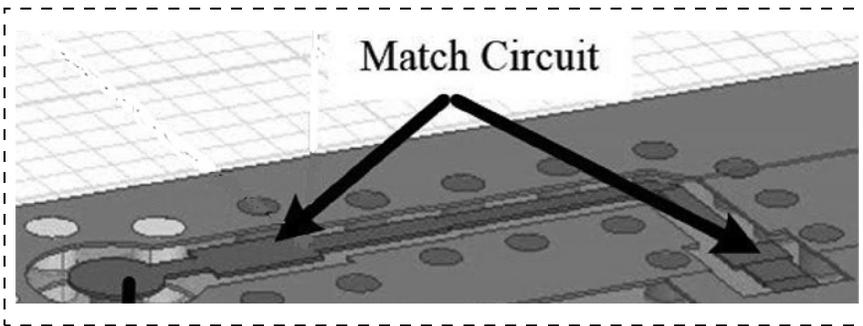


Рис. 25. Соединительная линия с согласующими шлейфами

(рис. 27) в частотных диапазонах 77...252 ГГц [37—49]. Компаунд образует также диэлектрик двухслойной антенны. Для интерпозера использована стандартная недорогая подложка FR-4 [37]. Рабочая частота платы данного типа доведена до 240 ГГц, при этом использованный для данного диапазона материал заливки (*mold*) имеет отличные ВЧ

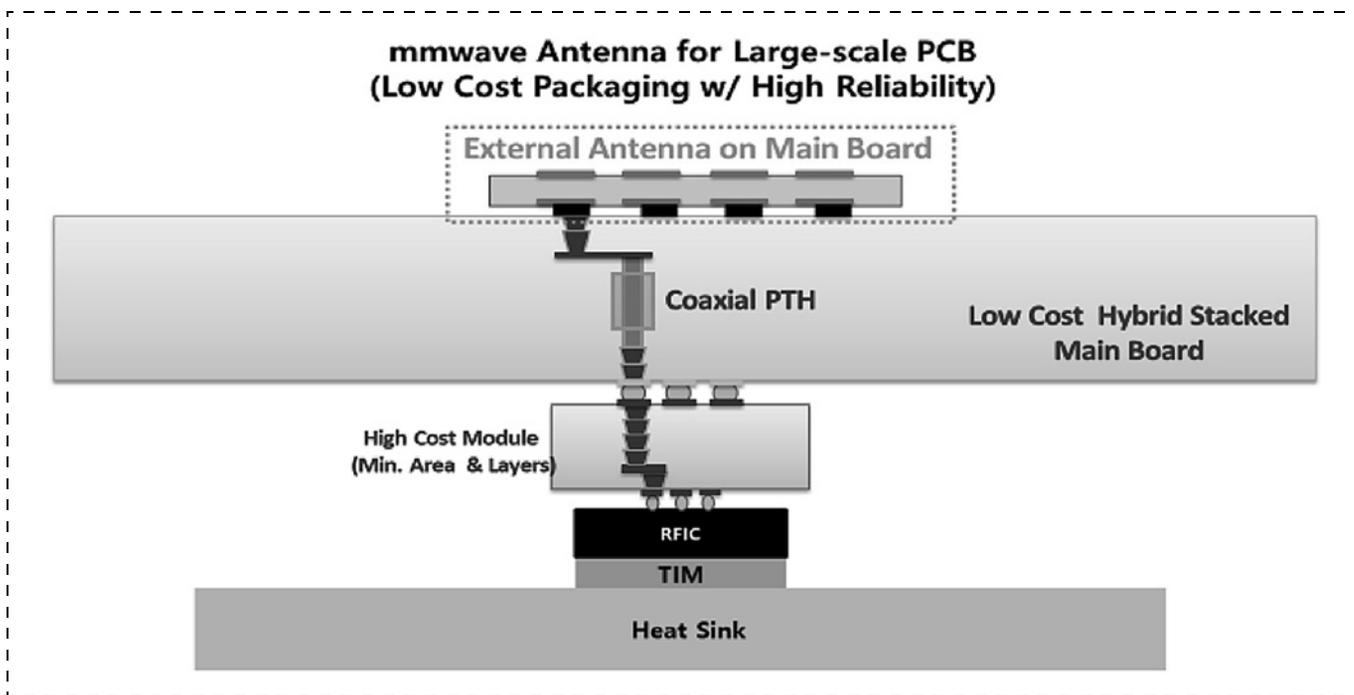


Рис. 26. Строение ФАР

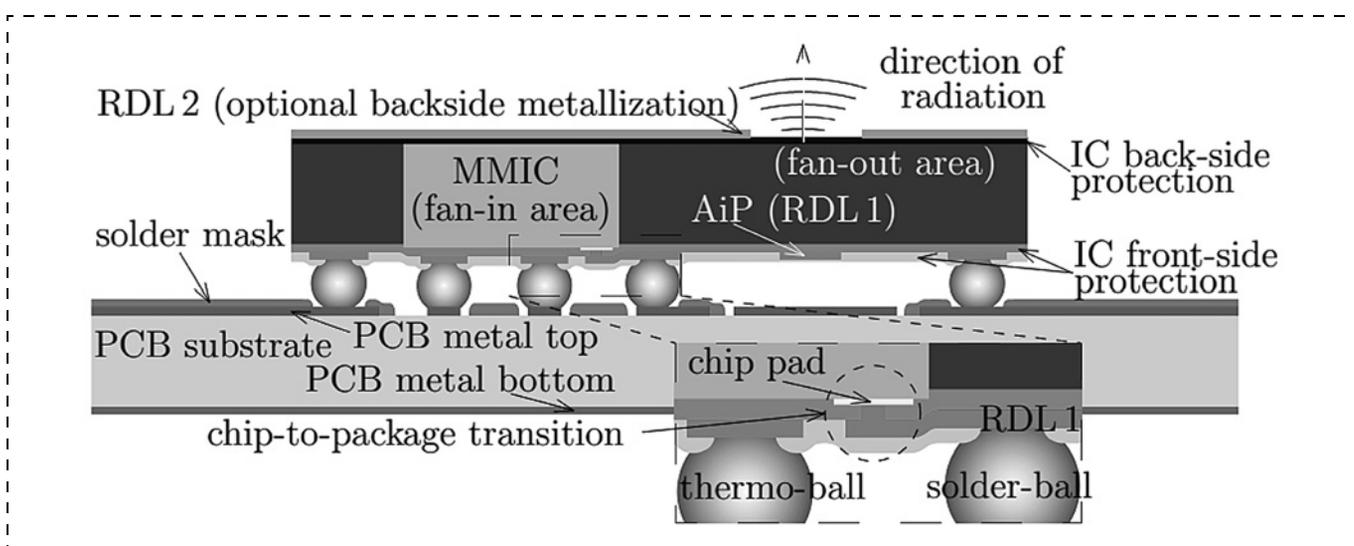


Рис. 27. СвК с интерпозером типа 2 и антенной в составе интерпозера

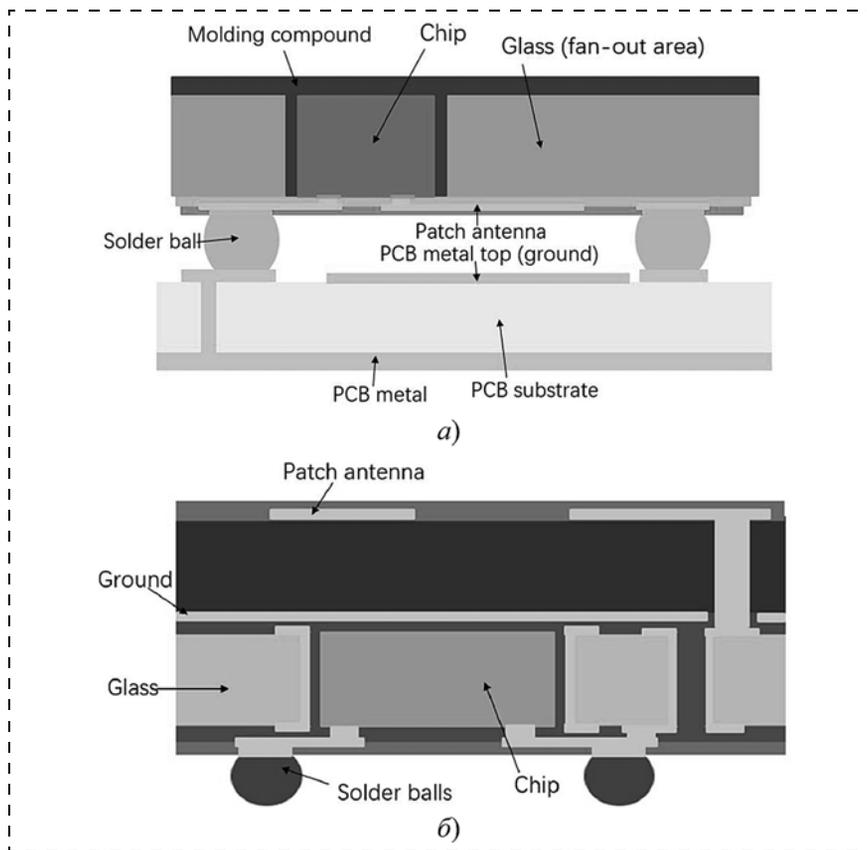


Рис. 28. Варианты строения интеропера по eGFO-технологии

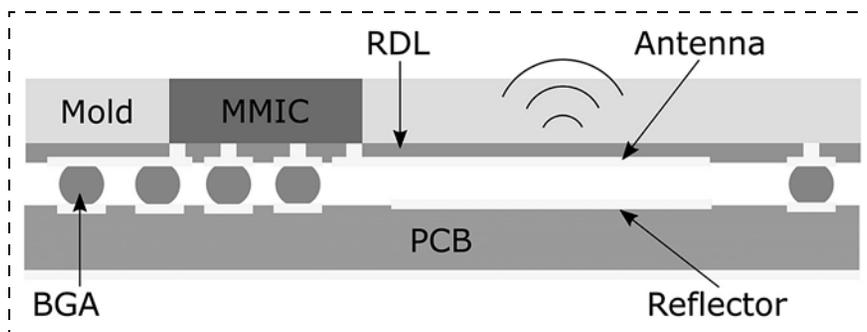


Рис. 29. Строение интеропера для частоты 140 ГГц

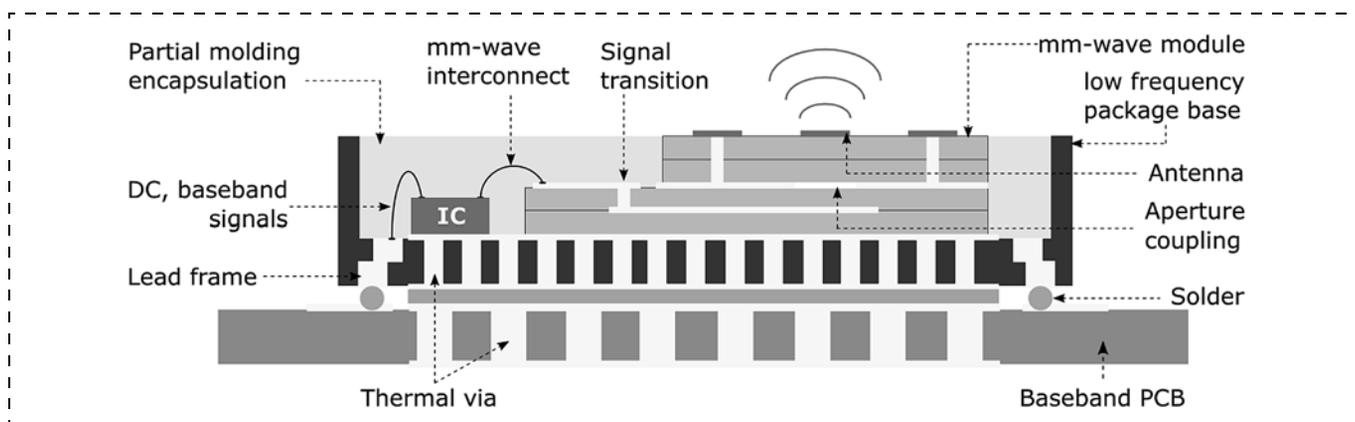


Рис. 30. Строение СВК с теплоотводом

характеристики, проверенные на частотах до 100 ГГц и выше. На частотах выше 240 ГГц проявляются неопределенности допуска тонкопленочного процесса согласно работе [46]. В работе [47] указан диэлектрик для RDL — органический материал WPR фирмы JSR-corporation.

Близкая по строению сборка создана на основе eGTO-технологии для интеропера типа 3 (*embedded glass fan out (eGFO) technology*) для частоты 77 ГГц (рис. 28) [50]. Близкая структура для частоты 140 ГГц, в которой отражатель антенны выполнен на печатной плате (рис. 29), описана в работе [51].

Реализована СВК диапазона 119,3...125,8 ГГц на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (Low Temperature Co-Fired Ceramic (LTCC) с теплоотводом (рис. 30) [52]. Использовано проволочное соединение СВЧ МИС (*mm-wave interconnect*), которое, как сказано в работе [52], осуществляется с помощью стандартных соединений проводом с расстоянием между площадками 520 мкм и высотой петли 100 мкм от контактной площадки. Для этих межсоединений не требуется специальной технологии изготовления и используется простой метод компенсации влияния

проводных соединений. СВЧ МИС заливают эпоксидной смесью Polytec TC 430-T.

Проволочное соединение СВЧ МИС применено также в АР на основе LTCC диапазона 143...153 ГГц [53].

Подобно многообразию органических веществ, состоящих из небольшого числа типов молекул, описанные выше типы интерпозеров имеют значительное число вариантов при вариации числа и материалов слоев, конструкции излучателей, способов монтажа. Критически важными являются типы используемых диэлектрических материалов, и прежде всего, их диэлектрические потери. Ниже рассматриваются максимальные рабочие частоты интерпозеров различных возможных материалов.

В обзоре, анализирующем разработки интерпозеров из LCP в V-диапазоне, приведена таблица с характеристиками диэлектрических материалов (потери оценены для V-диапазона [54].

Из таблицы следует, что материалы с малыми потерями неудобны в обработке и разработчики предпочитают материалы с большими потерями. Однако при повышении рабочих частот потери становятся критическим фактором.

В обзоре [17] перечислены следующие диэлектрические материалы для интерпозера: неорганические — LTCC, стекло, кремний, кварц; органические — ламинаты, органические диэлектрики — LCP, Benzocyclobutene polymer (BCB). Приведена диаграмма с рабочими частотами реализованных интерпозеров из различных материалов (рис. 31, см. четвертую сторону обложки).

Исследованы тестовые структуры Grooved Laminated Waveguide (GLWG, волноводы) по LTCC-технологии в полосе частот, включающем G-диапазон [55]. Указано, что погонные потери возрастают более чем в два раза при переходе от V- к G-диапазону.

На основе LTCC реализована СвК в диапазоне 118...170 ГГц с антенной в виде отдельного чипа и полостью под антенной (рис. 32) [56].

Тестовые антенны на основе LTCC реализованы в полосе до 270 ГГц [57].

Разработана АР 16×16 элементов для W-диапазона из пяти металлизированных слоев стекла со сквозной металлизацией, соединенных высокотемпературной компрессией (*thermal compression bonding*) [58].

Разработана диэлектрическая рупорная антенна на основе кремния, имеющая рабочую полосу 750...1000 ГГц [59].

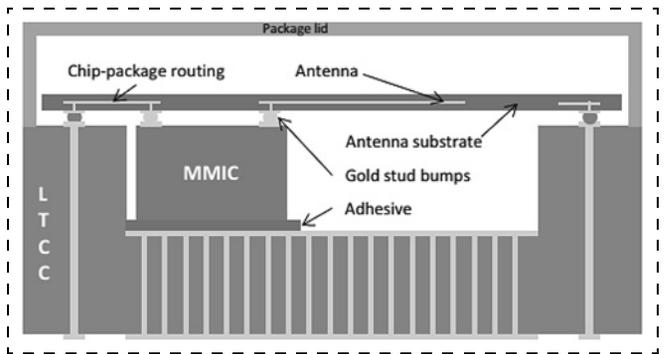


Рис. 32. СвК в диапазоне 118...170 ГГц с полостью под антенной

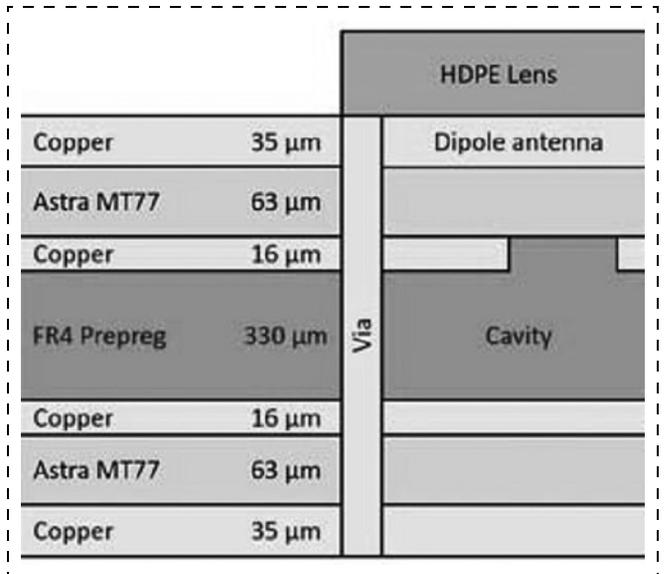


Рис. 33. Плата с органическими диэлектриками

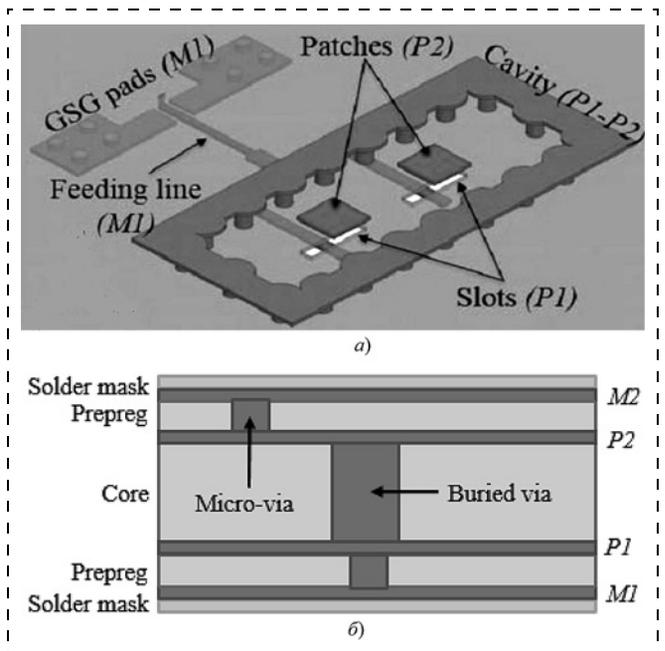


Рис. 34. Строение (а) и сечение (б) платы многослойной антенны

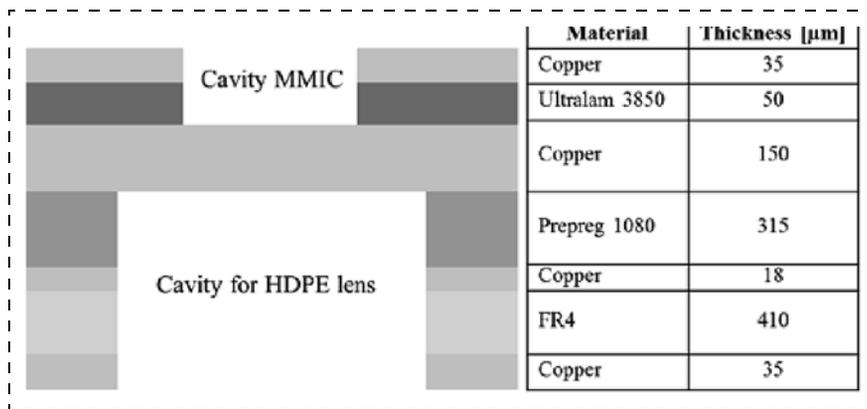


Рис. 35. Сечение интеропера из слоев диэлектрика FR-4 и LCP Ultralam

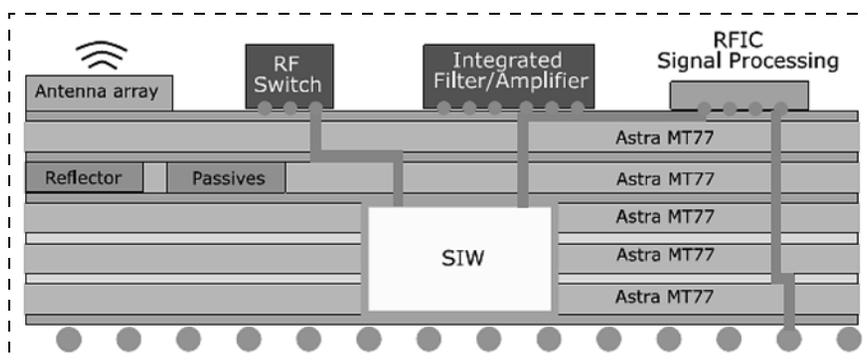


Рис. 36. Структура интеропера на основе ламината Astra MT77

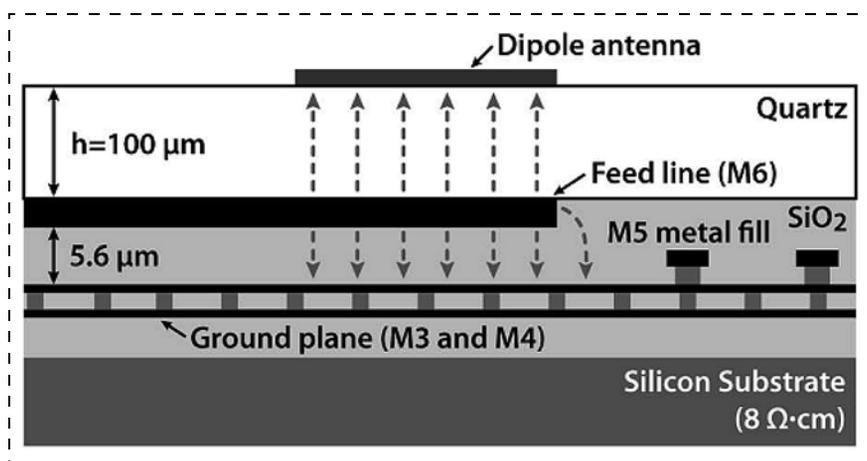


Рис. 37. Плата антенны с кварцевым слоем

В обзоре [60] приведены разработки интегрированных антенн для D-диапазона. В них использованы органические ламинаты фирмы Rogers Corporation, TLY-5 (фирма Taconic, США), Astra MT77 (фирма ISOLA Group), Megtron 7N (фирма Matrix Electronics Limited), LTCC, кварц.

Многослойная плата с органическими диэлектриками с интегрированной антенной диапазона 85...100 ГГц, сечение которой показано на рис. 33, описана в работе [61]. Использованы слои FR-4 и Astra MT77.

Для многослойной апертурно-связанной антенны (*aperture-coupled-patch antennas (ACA)*, показанной на рис. 34, получено согласование в диапазонах частот 215...240 ГГц и 280...300 ГГц. Антенна выполнена по технологии High Density Interconnect (HDI) organic packaging, HDI organic semi-additive technology, но тип органического материала не указан [62].

Интеропера типа 3 диапазона (77...107 ГГц) (рис. 35) создан из слоев диэлектрика FR-4 и LCP Ultralam 3850 (Rogers Corporation) [63].

Ламинат Astra MT77, имеющий меньшие потери относительно ламината LCP, использован в интерпере диапазона 110...170 ГГц, сечение которого показано на рис. 36 [64]. В данной работе приведено сравнение потерь диэлектрических мате-

Характеристики диэлектрических материалов [54]

Характеристика	LTCC	LCP	Плавленное кремнеземное стекло (silica glass)	Политетрафторэтилен, фторопласт-4, Polytetrafluoroethylen, (PTFE)
ϵ_r	5,9...9,1	2,91	3,8	2,1
$\tan\delta$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Обработываемость	Средняя	Хорошая	Плохая	Плохая
Шероховатость поверхности	Высокая	Высокая	Малая	Малая
Рабочий размер	Средний	Большой	Малый	Средний

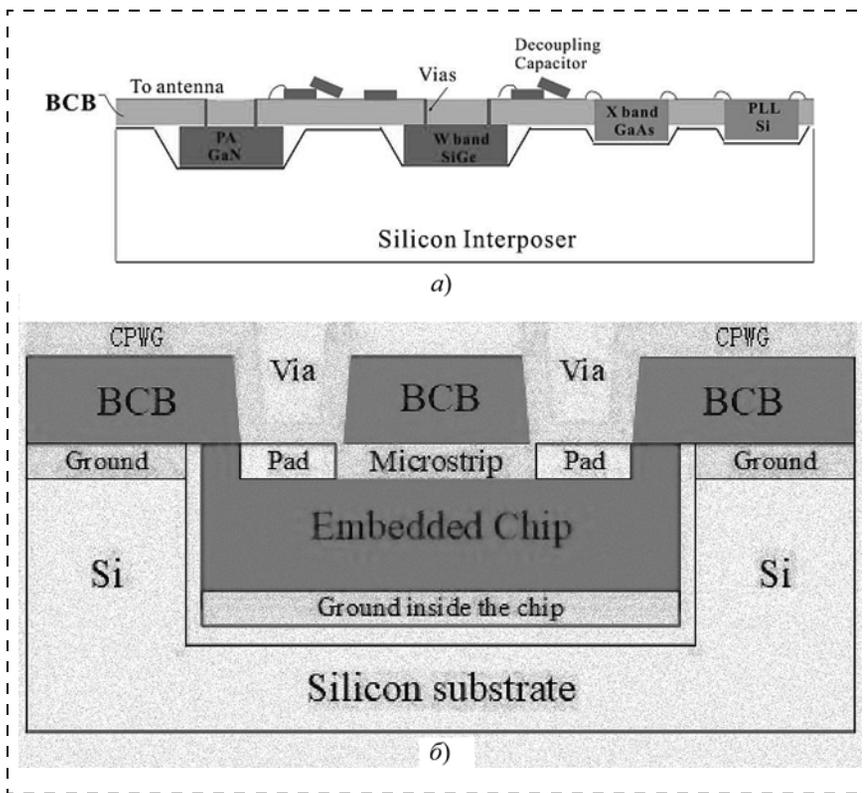


Рис. 38. Варианты интерпозера:

соединения через металлизированные отверстия в слое BCB (а), соединения слоем металлизации (б)

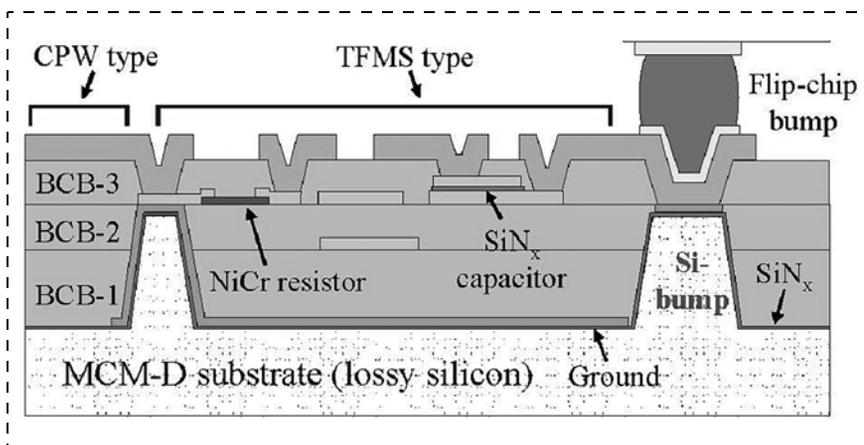


Рис. 39. Сечение интерпозера W-диапазона

риалов, согласно которому минимальные потери на частотах выше 200 ГГц имеет кварц, уступающий по удобству обработки ламинатам.

Антенна для диапазона 108...114 ГГц с двумя слоями металлизации образована кварцевой пластиной толщиной 100 мкм, наложенной на СВЧ МИС (рис. 37). При этом подводящая линия антенны выполнена в составе слоя металлизации МИС (слой *feed line* — М6), а верхний проводящий слой антенны — как металлизация

сверху кварца (слой *dipole antenna*) [65].

Плата из плавленного кремнеземного стекла (*silica*), на которую напылен слой RDL с полиимидом, — основа интерпозера с рабочей частотой до 180 ГГц [66].

Для соединителей слоев ламината типа *siloxane polyimide/epoxy* (SPIE) и BCB проведено сравнение потерь в полосе частот 75...110 ГГц. [67]. Микрополосковая линия с тремя слоями Картон Е (полиимидная пленка фирмы *DuPont*), толщиной 22...24 мкм, с прослойками BCB (12...14 мкм) имеет потери, близкие к потерям в тестовой линии передачи с эталонным диэлектриком "*alumina*" (оксид алюминия Al_2O_3), а подобная линия с прослойками SPIE (12...14 мкм) имеет заметно большие потери. Данные результаты указывают на важность контроля потерь, даже в тонких соединительных диэлектрических слоях интерпозера.

Интерпозер типа 3 со слоем BCB поверх СВЧ МИС, предназначенная для W-диапазона, описана в работе [68]. МИС соединяются через металлизированные отверстия в BCB слое (рис. 38, а), или проводники создаются слоем металлизации непосредственно на кристаллах (рис. 38, б).

Интерпозер из трех слоев BCB для W-диапазона, показанный на рис. 39, описан в работе [69].

Для создания AP 4×4 с двойной поляризацией в диапазоне 23,4...27,5 ГГц создана плата — интерпозер на основе девяти слоев ламината Rogers (рис. 40) [70]. Антенна реализована двумя верхними слоями металлизации.

Для W-диапазона разработана структура, в которой разводка RDL выполняется металлизированным слоем Rogers 4350 при фиксации МИС в слое эпоксидного компаунда (рис. 41) (RCC — resin-coated copper layer — покрытый диэлектриком медный слой) [71].

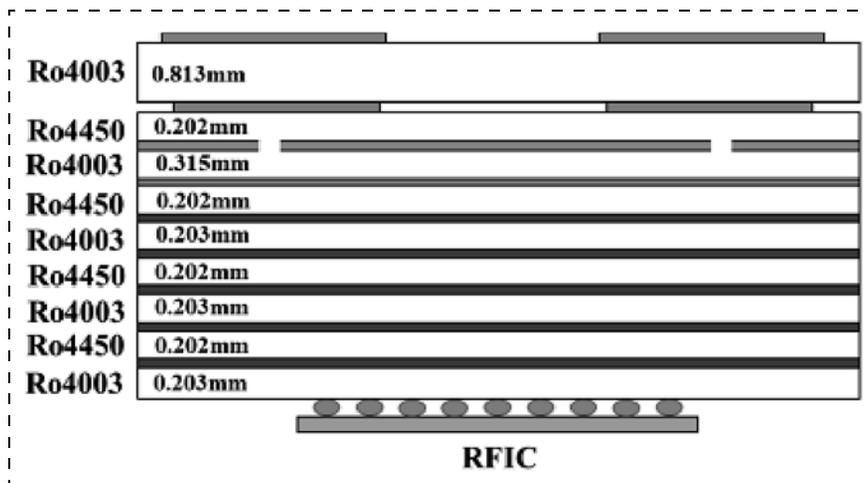


Рис. 40. Плата-интерпозер AP из материала Rogers

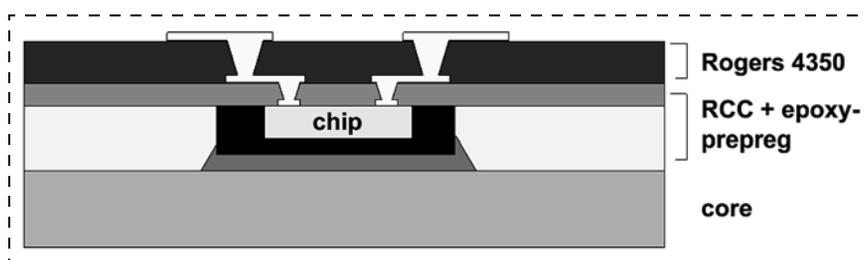


Рис. 41. Строение платы с разводкой RDL на основе материала Rogers

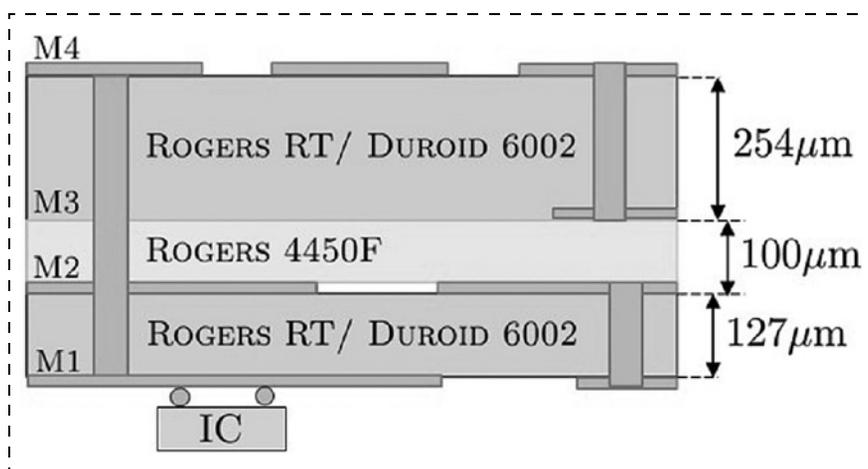


Рис. 42. Интерпозер на основе материала Rogers

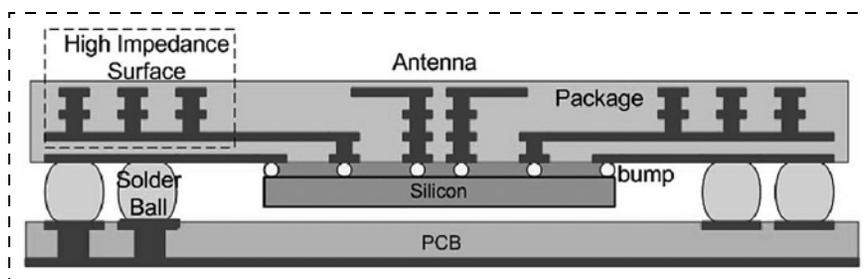


Рис. 43. СВК с интерпозером из эпоксидного ламината FR-4

Интерпозер с интегрированной антенной D-диапазона (114...144 ГГц) из материалов Rogers (рис. 42) описан в работе [72].

Полосу 20 ГГц для центральной частоты 160 ГГц обеспечивает интерпозер из эпоксидного ламината FR-4 со встроенной антенной, сечение которого показано на рис. 43 [73].

Использованная в работе [52] эпоксидная смесь Polytec TC 430-T исследована в работе [74]. Тангенс угла потерь $\tan\delta$ для этого материала в диапазоне 110...170 ГГц не превышает 0,0245, что признано приемлемым для СВК.

Заключение

Многообразие конструкций "система в корпусе" стимулировано необходимостью коммерческого использования их в системах 5G и автомобильной локации. Создан многовариантный конструкторско-технологический базис для платы интерпозера (СВЧ части СВК), что обеспечивает гибкость и универсальность технологического процесса. Реализуются платы интерпозеры с несколькими сотнями СВЧ МИС.

Шариковый и термокомпрессионный способы монтажа как более компактные вытеснили разварку проволокой.

Все основные используемые диэлектрические материалы, позволяющие реализовать FOWLP-сборку, преодолели частотный рубеж 100 ГГц. В то же время остается открытым вопрос выбора материалов для более высоких частот.

Массовая FOWLP-технология плат-интерпозеров, интегрированных с антенной, многократно снижает стоимость СВК. Однако независимо от масштабов производства, реализация

FOWLP-сборки требует использования комплекта дорогостоящих специализированных технологических установок, а также проведения контроля импедансов СВЧ передающих линий с помощью САПР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 22-29-01158.

Список литературы

1. Pfeiffer U. R., Grzyb J., Liu D., Gaucher B., Beukema T., Floyd B. A., Reynolds S. K. A chip-scale packaging technology for 60-GHz wireless chipsets // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. Vol. 54, N. 8. P. 3387–3397.
2. Pfeiffer U., Grzyb J., Liu D., Gaucher B., Beukema T., Floyd B., Reynolds S. A 60 GHz Radio Chipset Fully-Integrated in a Low-Cost Packaging Technology // 56th Electronic Components and Technology Conference. 2006. P. 1343–1346.
3. Luna J. A. Z., Dussopt L., Siligaris A. Hybrid On-Chip/In-Package Integrated Antennas for Millimeter-Wave Short-Range Communications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013. Vol. 61, N. 11. P. 5377–5384.
4. Chahat N., Tang A., Lee C., Sauleau R., Chattopadhyay G. Efficient CMOS Systems With Beam—Lead Interconnects for Space Instruments // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2015. Vol. 5, N. 4. P. 637–644.
5. Hanafi B., Gürbüz O., Dabag H., Buckwalter J. F., Rebeiz G., Asbeck P. Q-Band Spatially Combined Power Amplifier Arrays in 45-nm CMOS SOI // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2015. Vol. 63, N. 6. P. 1937–1950.
6. Sun M., Zhang Y. P., Liu D., Chua K. M., Wai L. L. A Ball Grid Array Package With a Microstrip Grid Array Antenna for a Single-Chip 60-GHz Receiver // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2011. Vol. 59, N. 6. P. 2134–2140.
7. Liu D., Zhang Y. Antenna in Package Technology and Applications. Wiley-IEEE Press, 2020. 416 p.
8. Hwang L.-T., Horng T.-S. J. 3D IC and RF SiPs: Advanced Stacking and Planar Solutions for 5G Mobility. Wiley-IEEE Press, 2017. 464 p.
9. **Substrate-Integrated** Millimeter-Wave Antennas for Next-Generation Communication and Radar Systems, Editor(s): Chen Z. N., Qing X., Wiley-IEEE Press, 2021. 320 p.
10. Keser B., Kroehnert S. Advances in Embedded and Fan-Out Wafer Level Packaging Technologies. Wiley-IEEE Press, 2019. 576 p.
11. Sturdivant R. Microwave and Millimeter-Wave Electronic Packaging. Artech, 2013. 280 p.
12. Ulrich R. K., Brown W. D. Advanced Electronic Packaging. Wiley-IEEE Press, 2006.
13. Nakajima H. Achievement and future challenges in 3D researches // 2010 5th International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference, 20–22 Oct. 2010. P. 1–55.
14. Watanabe A. O., Ali M., Sayeed Y. B., Tummala R. R. Pulugurtha M. R. A Review of 5G Front-End Systems Package Integration // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2021. Vol. 11, N. 1. P. 118–133.
15. Gu X., Liu D., Sadhu B. Packaging and Antenna Integration for Silicon-Based Millimeter-Wave Phased Arrays: 5G and Beyond // IEEE Journal of Microwaves, 2021. Vol. 1, N. 1. P. 123–134.
16. Klibanov L. Antenna in Package (AiP) Integration for mmWave Technology. URL: https://www.researchgate.net/publication/341205854_Antenna_in_Package_AiP_Integration_for_mmWave_Technology
17. Gu X., Liu D., Sadhu B. Packaging and Antenna Integration for Silicon-Based Millimeter-Wave Phased Arrays: 5G and Beyond // IEEE Journal of Microwaves. 2021. Vol. 1, N. 1. P. 123–134.
18. Zhang Y., Mao J. An Overview of the Development of Antenna in-Package Technology for Highly Integrated Wireless Devices // Proceedings of the IEEE. 2019. Vol. 107, N. 11. P. 2265–2280.
19. **3-нм топологии:** размытие границ между SoC, модулями и платами // Экспресс-информация по зарубежной электронной технике. 2020. Вып. 7 (6706). С. 5–8.
20. Макушин М., Мартынов В. Производственные технологии микроэлектроники: проблемы развития. Часть 1. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2020. № 3 (00194). С. 76–88.
21. Hancock T. M., Demmin J. C. Heterogeneous and 3D Integration at DARPA // 2019 International 3D Systems Integration Conference (3DIC). 2019. P. 1–4.
22. Красников Г. Я., Панасенко П. В., Волосов А. В., Щербаков Н. А. Тенденции развития технологии сложнофункциональной гетероинтегрированной ЭКБ // Международный форум "Микроэлектроника-2018", 4-я Международная научная конференция "Электронная компонентная база и микроэлектронные модули". Сборник тезисов. 01–06 октября 2018. С. 341–344.
23. Liu X., Wei Zhang, Hao D., Liu Y. Cost-Effective Surface-Mount Off-Center-Fed Dipole Antenna Element and Its Array for 5G Millimeter Wave New Radio Applications // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2021. Vol. 11, N. 7. P. 1106–1114.
24. Gu X., Liu D., Hasegawa Y., Masuko K., Baks C., Suto Y., Fujisaku Y., Sadhu B. Paidimarri A., Guan N., Valdes-Garcia A. Antenna-in-Package Integration for a Wide-Band Scalable 5G Millimeter-Wave Phased-Array Module // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2021. Vol. 31, N. 6. P. 682–684.
25. Hopsch F., Trieb R., Heinig A. Construction of RF-blocks in package technologies // 2020 International Wafer Level Packaging Conference (WLPC). 2020. P. 1–6.
26. Mei S., Guan L. T., Peng X. D., Chong C. T., Bhattacharya S. FOWLP RF Passive Circuit Designs for 77 GHz MIMO radar applications // 2020 IEEE 22nd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), 2020. P. 445–448.
27. Shi T., Gong Y., Ravichandran S., Sundaram V., Cressler J. D., Tummala R. Next Generation of Automotive Radar with Leading-Edge Advances in SiGe Devices and Glass Panel Embedding (GPE). 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2018, pp. 1245–1250.
28. Патент США US20190305430A1, МПК H01Q — 009/04, H01Q — 021/00, H01Q — 019/13. Antenna boards and communication devices / Trang Thai, Sidharth Dalmia;

заявитель и патентообладатель Intel IP Corporation. — US15/939,180; заявл. 2018-03-28; опубл. 2019-10-03.

29. **Hong W., Baek K., Goudelev A.** Grid Assembly-Free 60-GHz Antenna Module Embedded in FR-4 Transceiver Carrier Board // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2013. Vol. 61, N. 4. P. 1573—1580.

30. **Guan L. T., Ho D. S. W., Chong C. T., Bhattacharya S.** 3D FOWLP Integration // 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). 2020. P. 1728—1735.

31. **Lambert W. J., Amadjikpe A. L., Yao J., Sri Chavali C. J., Sagazio P., Nam Y. S., Abu-Mahaimed M., Pellerano S.** Scalable Multichip Packaging With Integrated Antenna Array for a 73-GHz Transceiver IC // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2021. Vol. 69, N. 1. P. 387—398.

32. **Yook J. M., Kim D., Park B. J., Sim S., Eo Y. S., Kim J. C.** A Compact 28 GHz RF Front-end Module using IPDs and Wafer-level Metal Fan-out Packaging // *Proceedings of the 49th European Microwave Conference*. 2019. P. 436—439.

33. **Estrada J. A., Lasser G., Pinto M., Herrault F., Popović Z.** Metal Embedded Chip Assembly Processing for Enhanced RF Circuit Performance // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2019. Vol. 67, N. 9. P. 3537—3546.

34. **Luo X., Ouyang J., Chen Z. H., Yan Y., Han L., Wu Z., Yu T., Zheng K.** A Scalable Ka-Band 1024-Element Transmit Dual-Circularly-Polarized Planar Phased Array for SATCOM Application // *IEEE Access*, 24 August 2020. Vol. 8. P. 156084—156095.

35. **Chen L., Sun X., Chen F.** Development of 500mm×500mm Fan-out panel level packaging for heterogeneous chip integration // 2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). 2020. P. 1—6.

36. **Ha D., Baek K., Lee J., Park S., Park J. H., Heo J., Lee Y. J.** Large Scale Array Antenna Packaging for 5G mmwave Base Station // *Proceedings of the 50th European Microwave Conference*, 2020. P. 45—48.

37. **Beck C., Ng H. J., Agethen R., Pourmousavi M., Forstner H. P., Wojnowski M., Pressel K., Weigel R., Hagelauer A., Kissinger D.** Industrial mmWave Radar Sensor in Embedded-Wafer-Level BGA Packaging Technology // *IEEE Sensors Journal*. 2016. Vol. 16, N. 17. P. 6566—6578.

38. **Zhu C., Duan Z.** Design of 94-GHz Wideband Waveguide-Feed Patch Antenna and Array in eWLB Package // *Proceedings of the 50th European Microwave Conference*. 2020. P. 824—827.

39. **Duan Z., Wu B., Zhu C., Wang Y., Jin W., Liu Y., Wu Y., Zhang T., Liu M., Dou B., Liao B., Lv W., Pan D., Li Y., Wang C., Dai Y., Li P., Gao H.** A 76-to-81GHz 2×8 FMCW MIMO Radar Transceiver with Fast Chirp Generation and Multi-Feed Antenna-in-Package Array // 2021 IEEE International Solid-State Circuits Conference. 2021. P. 228—230.

40. **Ahmed F., Furqan M., Stelzer A.** 120-GHz and 240-GHz Broadband Bow-Tie Antennas in eWLB Package for High Resolution Radar Applications // *Proceedings of the 48th European Microwave Conference*, 2018. P. 1109—1112.

41. **Ahmed F., Furqan M., Stelzer A.** On the Design of Antennas in eWLB Package for Radar Applications above 100 GHz // 2019 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP). 2019. P. 145—147.

42. **Stelzer A.** Integrated Microwave Sensors in SiGe with Antenna in Package: From Concepts to Solutions, THz-Workshop: Millimeter- and Sub-Millimeter-Wave circuit design and characterization, 26 September 2014. P. 1—15.

43. **Wojnowski M., Wagner C., Lachner R., Böck J., Sommer G., Pressel K.** A 77-GHz SiGe Single-Chip Four-Channel Transceiver Module with Integrated Antennas in Embedded Wafer-Level BGA Package // 2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference, 29 May—1 June 2012. P. 1027—1032.

44. **Hagelauer A., Wojnowski M., Pressel K., Weigel R., Kissinger D.** Integrated Systems-in-Package // *IEEE Microwave Magazine*, January/February 2018. P. 48—56.

45. **Hamidipour A., Fischer A., Jahn M., Stelzer A.** 160-GHz SiGe-Based Transmitter and Receiver With Highly Directional Antennas in Package // 2013 8th European Microwave Integrated Circuits Conference Proceedings, 2013. P. 81—84.

46. **Stelzer A., Feger R.** Integrated microwave sensors in SiGe with antenna in package: From concepts to solutions // 2016 22nd International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECOM), 19—21 Sept. 2016. P. 1—7.

47. **Henawy M., Schneider M.** Integrated Antennas in eWLB Packages for 77 GHz and 79 GHz Automotive Radar Sensors // *Proceedings of the 41st European Microwave Conference*, 2011. P. 1312—1315.

48. **Zhu C., Wang Y., Duan Z., Dai Y.** Design of Patch Antenna in Embedded Glass Fan Out Package for 77-GHz Automotive Radar // 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 8—11 Dec. 2020. P. 1066—1068.

49. **Zhu C., Duan Z.** Design of 94-GHz Wideband Waveguide-Feed Patch Antenna and Array in eWLB Package // *Proceedings of the 50th European Microwave Conference*, 12—14 January 2021, pp. 824—827.

50. **Yu T., Zhang X., Chen L., Ren X., Duan Z., Yu D.** Development of Embedded Glass Wafer Fan-Out Package With 2D Antenna Arrays for 77GHz Millimeter-wave Chip // 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). 2020. P. 31—36.

51. **Bhutani A., Bekker E., de Oliveira L. G., Pauli M., Zwick T.** 140 GHz Broadband Antenna in Embedded Wafer-Level Ball Grid Array Technology // 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 22—26 March 2021. P. 1—5.

52. **Bhutani A., Göttel B., Lipp A., Zwick T.** Packaging Solution Based on Low-Temperature Cofired Ceramic Technology for Frequencies Beyond 100 GHz // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 9, N. 5. P. 945—954.

53. **Zhang B., Gulan H., Zwick T., Li Y., Oderfalt U., Carlsson F., Zirath H.** Integration of a 140 GHz Packaged LTCC Grid Array Antenna With an InP Detector // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 5, N. 8. P. 1060—1068.

54. **Hosono R., Uemichi Y., Hasegawa Y., Nakatani Y., Kobayashi K., Guan N.** Development of millimeter-wave devices based on liquid crystal polymer (LCP) substrate // *IEICE Electronics Express*. 2017. Vol. 14, N. 20. P. 1—13.

55. **Kärfelt C., Coant P., Sinou M., Coupez J.-P., Bourreau D., Pédén A.** Grooved Laminated Waveguide Devices for U-, V-, W- and G-band Applications // *Proceedings of the 45th European Microwave Conference*, 7—10 Sept 2015. P. 777—780.

56. **Gottel B., Beer S., Pauli M., Zwick T.** Ultra Wideband D-Band Antenna Integrated in a LTCC based QFN Package using a Flip-Chip Interconnect // Proceedings of the 43rd European Microwave Conference, 7–10 Oct 2013. P. 227–230.
57. **Chen Z. N., Qing X., Sun M., Yeap S. B., Liu W., Xu J., Hong W., Gong K.** Substrate-integrated Antennas at 60/77/140/270 GHz // 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), 30 June–3 July 2015. P. 281–282.
58. **Wu Y., Yu T., Zhang M., Yu D., Hirokawa J., Liu Q. H.** A W-Band Corporate-Fed Hollow-Waveguide Slot Array Antenna by Glass Micromachining // 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 25–28 Jan. 2021. P. 435–436.
59. **Zhu H. T., Xue Q., Hui J. N., Pang S. W.** A 750–1000 GHz H-Plane Dielectric Horn Based on Silicon Technology // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2016. Vol. 64, N. 12. P. 5074–5083.
60. **De Kok M., A. Smolders B., Johannsen U.** A Review of Design and Integration Technologies for D-Band Antennas // IEEE Open Journal of Antennas and Propagation. 2021. Vol. 2. P. 746–758.
61. **Dyck A., Kuri M., Rosch M., Tessmann A., Ambacher O.** A Dielectric-Filled Cavity-Backed Lens-Coupled Dipole Antenna at 100 GHz // 2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 20–23 Jan. 2019. P. 1–3.
62. **Lacombe E., Giancesello F., Bisognin A., Luxey C., Titz D., Gulan H., Zwick T.** 240 GHz Antenna Integrated on Low-Cost Organic Substrate Packaging Technology Targeting High-Data Rate sub-THz Telecommunication // Proceedings of the 47th European Microwave Conference, 10–12 Oct 2017. P. 164–167.
63. **Rösch M. A., Tessmann A., Leuther A., Kuri M., Wagner S., Ambacher O., Gulan H.** Compact W-band Receiver Module on Hybrid Liquid Crystal Polymer Board // Proceedings of the 13th European Radar Conference, 5–7 Oct 2016. P. 370–373.
64. **Ravichandran S., Huang K.-Q., Rehman M., Erdogan S., Watanabe A., Nedumthakady N., Liu F., Kathaperumal M., Swaminathan M.** Packaging Approaches for mmWave and Sub-THz Communication // 2019 IEEE MTT-S International Microwave Conference on Hardware and Systems for 5G and Beyond (IMC-5G), 15–16 Aug. 2019. P. 1–5.
65. **Shin W., Ku B.-H., Inac O., Ou Y. C., Rebeiz G. M.** A 108–114 GHz 4×4 Wafer-Scale Phased Array Transmitter With High-Efficiency On-Chip Antennas // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2013. Vol. 48, N. 9. P. 2041–2055.
66. **Ito M., Marumoto T.** Silica-Based Packaging Structure for D-band RF module // 2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium — IMS. 2018. P. 871–874.
67. **Pham A. V. H., Laskar J., Krishnamurthy V. B., Cole H. S., Sitnik-Nieters T.** Ultra low loss millimeter wave multichip module interconnects // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B. 1998. Vol. 21, N. 3. P. 302–308.
68. **Tao Y.-X., Yang X., Zhang C.-R., Zhou L.** Design and Fabrication of W band Heterogeneous Integrated Transceivers // 2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), 20–23 Sept. 2020. P. 1–3.
69. **Song S., Yoo C.-S., Kim D., Choi S., Park J.-C., Seo K.-S.** Development of Millimeter-wave Integrated Passives on MCM-D Technology with Thin-Film Microstrip Line // 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 11–16 June 2006. P. 952–955.
70. **Li S., Zhang R., Yi Z., Ding Y., Ren E., Yang G.** A Hybrid Beamforming-Based Transceiver with Antenna in Package for Millimeter-Wave Small Cell // IEEE 4th International Conference on Electronics Technology, 2021. P. 748–751.
71. **Richter M. D., Becker K.-F., Bottcher L., Schneider M.** Interconnects for Buried W-Band MMICs Using Novel System-in-Package Technology // 2009 German Microwave Conference, 16–18 March 2009. P. 1–4.
72. **Manzillo F. F., Clemente A., Blampey B., Pares G., Siligaris A., González-Jiménez J. L.** Transmitarray Antenna with Integrated Frequency Multiplier for High-speed D-band Communications in Low-cost PCB Technology // Proc. of the 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2019), 31 March–5 April 2019, pp. 1–4.
73. **Ginsburg B. P., Ramaswamy S. M., Rentala V., Seok E., Sankaran S., Haroun B.** A 160 GHz Pulsed Radar Transceiver in 65 nm CMOS // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2014. Vol. 49, N. 4. P. 984–995.
74. **Goettel B., Winkler W., Bhutani A., Boes F., Pauli M., T. Zwick T.** Packaging solution for a millimeter-wave system-on-chip radar // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2018. Vol. 8, N. 1. P. 73–81.

A. P. Lisitsky¹, Ph. D., Leading Researcher, liant222@yandex.ru,
P. P. Maltsev^{1,2}, D. Sc., Scientific Director, Head of the Laboratory, isvch@isvch.ru,
O. S. Matveenko^{1,2}, Ph. D., Leading Researcher, unicfive@yandex.ru,
A. O. Mikhalev, Junior Researcher¹, engineer², m2lkeny@yandex.ru,
V. R. Skrinsky², Assistant, vlad_ckr@mail.ru

¹ V. G. Mokerov Institute of ultra high frequency semiconductor electronics of the Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow, 117105, Russian Federation

² Federal state budgetary educational institution of higher education "MIREA — Russian technological University", Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author:

Lisitsky Anton P., Ph. D., Leading Researcher, V. G. Mokerov Institute of ultra high frequency semiconductor electronics of Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow, 117105, Russian Federation
 E-mail: liant222@yandex.ru

Assembly Techniques of "System-in-Package" in Millimeter Wavelength Range: Structures and Materials. Review

Received on January 10, 2022

Accepted on January 17, 2022

The review describes the classification for "system-in-package" structures and implementation options for interposers in millimeter wavelength range, an analysis was made of achievable operating frequencies for different dielectric materials.

Keywords: system-in-package, interposer, antenna, ultra high frequency monolithic integrated circuit, design and technological basis, millimeter wavelength range

For citation:

Lisitsky A. P., Maltsev P. P., Matveenko O. S., Mikhalev A. O., Skrinky V. R. Assembly Techniques of "System-in-Package" in Millimeter Wavelength Range: Structures and Materials. Review, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 30–50.

DOI: 10.17587/nmst.24.30-50

References

1. Pfeiffer U. R., Grzyb J., Liu D., Gaucher B., Beukema T., Floyd B. A., Reynolds S. K. A chip-scale packaging technology for 60-GHz wireless chipsets, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, vol. 54, no. 8, pp. 3387–3397.
2. Pfeiffer U., Grzyb J., Liu D., Gaucher B., Beukema T., Floyd B., Reynolds S. A 60 GHz Radio Chipset Fully-Integrated in a Low-Cost Packaging Technology, *56th Electronic Components and Technology Conference*, 2006, pp. 1343–1346.
3. Luna J. A. Z., Dussopt L., Siligaris A. Hybrid On-Chip/In-Package Integrated Antennas for Millimeter-Wave Short-Range Communications, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, vol. 61, no. 11, pp. 5377–5384.
4. Chahat N., Tang A., Lee C., Sauleau R., Chattopadhyay G. Efficient CMOS Systems With Beam-Lead Interconnects for Space Instruments, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, vol. 5, no. 4, pp. 637–644.
5. Hanafi B., Gürbüz O., Dabag H., Buckwalter J. F., Rebeiz G., Asbeck P. Q-Band Spatially Combined Power Amplifier Arrays in 45-nm CMOS SOI, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, vol. 63, no. 6, pp. 1937–1950.
6. Sun M., Zhang Y. P., Liu D., Chua K. M., Wai L. L. A Ball Grid Array Package With a Microstrip Grid Array Antenna for a Single-Chip 60-GHz Receiver, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, vol. 59, no. 6, pp. 2134–2140.
7. Liu D., Zhang Y. Antenna in Package Technology and Applications, Wiley-IEEE Press, 2020, 416 p.
8. Hwang L.-T., Horng T.-S. J. 3D IC and RF SiPs: Advanced Stacking and Planar Solutions for 5G Mobility, Wiley-IEEE Press, 2017, 464 p.
9. Substrate-Integrated Millimeter-Wave Antennas for Next-Generation Communication and Radar Systems, Editor(s): Chen Z. N., Qing X., Wiley-IEEE Press, 2021, 320 p.
10. Keser B., Kroehnert S. Advances in Embedded and Fan-Out Wafer Level Packaging Technologies, Wiley-IEEE Press, 2019, 576 p.
11. Sturdivant R. Microwave and Millimeter-Wave Electronic Packaging, Artech, 2013, 280 p.
12. Ulrich R. K., Brown W. D. Advanced Electronic Packaging, Wiley-IEEE Press, 2006, 840 p.
13. Nakajima H. Achievement and future challenges in 3D researches, *2010 5th International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference*, 20–22 Oct. 2010, pp. 1–55.
14. Watanabe A. O., Ali M., Sayeed Y. B., Tummala R. R., Pulgurtha M. R. A Review of 5G Front-End Systems Package Integration, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 118–133.
15. Gu X., Liu D., Sadhu B. Packaging and Antenna Integration for Silicon-Based Millimeter-Wave Phased Arrays: 5G and Beyond, *IEEE Journal of Microwaves*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 123–134.
16. Klibanov L. Antenna in Package (AiP) Integration for mmWave Technology https://www.researchgate.net/publication/341205854_Antenna_in_Package_AiP_Integration_for_mmWave_Technology
17. Gu X., Liu D., Sadhu B. Packaging and Antenna Integration for Silicon-Based Millimeter-Wave Phased Arrays: 5G and Beyond, *IEEE Journal of Microwaves*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 123–134.
18. Zhang Y., Mao J. An Overview of the Development of Antenna in-Package Technology for Highly Integrated Wireless Devices, *Proceedings of the IEEE*, 2019, vol. 107, no. 11, pp. 2265–2280.
19. 3-nm topologii: razmitie granis megdu SoC, modulami i platami. *Express-informasia po zarubegnoi elektronnoi tekhnike*, 2020, is. 7 (6706), pp. 5–8.
20. Makushin M., Martinov M. Proizvodstvennie tehnologii microelektroniki: problemi razvitia, chast 1, *Elektronika: nauka, tehnologiya, business*, 2020, no. 3 (00194), pp. 76–88 (in Russian).
21. Hancock T. M., Demmin J. C. Heterogeneous and 3D Integration at DARPA, *2019 International 3D Systems Integration Conference (3DIC)*, 2019, pp. 1–4.
22. Krasnikov G. Y., Panasenko P. V., Volosov A. V., Cherbakov N. A. Tendensii razvitiya tehnologii slognofunktional-

noi heterointegrirrovannoi EKB, *Megdunarodnii forum "Microelectronika-2018"*, 4-ya Megdunarodnaya nauchnaya konferentsia "Electronnaya componentnaya baza i microelectronnyye moduli". *Sbornik thesisov*, 01–06 oktyabrya 2018, pp. 341–344 (in Russian).

23. **Liu X., Wei Zhang, Hao D., Liu Y.** Cost-Effective Surface-Mount Off-Center-Fed Dipole Antenna Element and Its Array for 5G Millimeter Wave New Radio Applications, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2021, vol. 11, no. 7, pp. 1106–1114.

24. **Gu X., Liu D., Hasegawa Y., Masuko K., Baks C., Suto Y., Fujisaku Y., Sadhu B., Paidimarri A., Guan N., Valdes-Garcia A.** Antenna-in-Package Integration for a Wide-Band Scalable 5G Millimeter-Wave Phased-Array Module, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2021, vol. 31, no. 6, pp. 682–684.

25. **Hopsch F., Trieb R., Heinig A.** Construction of RF-blocks in package technologies, *2020 International Wafer Level Packaging Conference (WLPC)*, 2020, pp. 1–6.

26. **Mei S., Guan L. T., Peng X. D., Chong C. T., Bhattacharya S.** FOWLP RF Passive Circuit Designs for 77 GHz MIMO radar applications, *2020 IEEE 22nd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, 2020, pp. 445–448.

27. **Shi T., Gong Y., Ravichandran S., Sundaram V., Cressler J. D., Tummala R.** Next Generation of Automotive Radar with Leading-Edge Advances in SiGe Devices and Glass Panel Embedding (GPE). *2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2018, pp. 1245–1250.

28. **Patent USA US20190305430A1**, МПК HO1Q-009/04, HO1Q-021/00, HO1Q-019/13. Antenna boards and communication devices / Trang Thai, Sidharth Dalmia; application and patent holder Intel IP Corporation. — US15/939,180; claimed 2018-03-28; published 2019-10-03.

29. **Hong W., Baek K., Goudelev A.** Grid Assembly-Free 60-GHz Antenna Module Embedded in FR-4 Transceiver Carrier Board, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, vol. 61, no. 4, pp. 1573–1580.

30. **Guan L. T., Ho D. S. W., Chong C. T., Bhattacharya S.** 3D FOWLP Integration, *2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2020, pp. 1728–1735.

31. **Lambert W. J., Amadjikpe A. L., Yao J., Sri Chavali C. J., Sagazio P., Nam Y. S., Abu-Mahaimed M., Pellerano S.** Scalable Multichip Packaging With Integrated Antenna Array for a 73-GHz Transceiver IC, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, vol. 69, no. 1, pp. 387–398.

32. **Yook J. M., Kim D., Park B. J., Sim S., Eo Y. S., Kim J. C.** A Compact 28 GHz RF Front-end Module using IPDs and Wafer-level Metal Fan-out Packaging, *Proceedings of the 49th European Microwave Conference*, 2019, pp. 436–439.

33. **Estrada J. A., Lasser G., Pinto M., Herrault F., Popović Z.** Metal Embedded Chip Assembly Processing for Enhanced RF Circuit Performance, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, vol. 67, no. 9, pp. 3537–3546.

34. **Luo X., Ouyang J., Chen Z. H., Yan Y., Han L., Wu Z., Yu T., Zheng K.** A Scalable Ka-Band 1024-Element Transmit Dual-Circularly-Polarized Planar Phased Array for SATCOM Application, *IEEE Access*, 24 August 2020, vol. 8, pp. 156084–156095.

35. **Chen L., Sun X., Chen F.** Development of 500mm×500mm Fan-out panel level packaging for heterogeneous chip integration, *2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, 2020, pp. 1–6.

36. **Ha D., Baek K., Lee J., Park S., Park J. H., Heo J., Lee Y. J.** Large Scale Array Antenna Packaging for 5G mmwave Base Station, *Proceedings of the 50th European Microwave Conference*, 2020, pp. 45–48.

37. **Beck C., Ng H. J., Agethen R., Pourmousavi M., Forstner H. P., Wojnowski M., Pressel K., Weigel R., Hagelauer A., Kissinger D.** Industrial mmWave Radar Sensor in Embedded-Wafer-Level BGA Packaging Technology, *IEEE Sensors Journal*, 2016, vol. 16, no. 17, pp. 6566–6578.

38. **Zhu C., Duan Z.** Design of 94-GHz Wideband Waveguide-Feed Patch Antenna and Array in eWLB Package, *Proceedings of the 50th European Microwave Conference*, 2020, pp. 824–827.

39. **Duan Z., Wu B., Zhu C., Wang Y., Jin W., Liu Y., Wu Y., Zhang T., Liu M., Dou B., Liao B., Lv W., Pan D., Li Y., Wang C., Dai Y., Li P., Gao H.** A 76-to-81GHz 2×8 FMCW MIMO Radar Transceiver with Fast Chirp Generation and Multi-Feed Antenna-in-Package Array, *2021 IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2021, pp. 228–230.

40. **Ahmed F., Furqan M., Stelzer A.** 120-GHz and 240-GHz Broadband Bow-Tie Antennas in eWLB Package for High Resolution Radar Applications. *Proceedings of the 48th European Microwave Conference*, 2018, pp. 1109–1112.

41. **Ahmed F., Furqan M., Stelzer A.** On the Design of Antennas in eWLB Package for Radar Applications above 100 GHz, *2019 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, 2019, pp. 145–147.

42. **Stelzer A.** Integrated Microwave Sensors in SiGe with Antenna in Package: From Concepts to Solutions, *THz-Workshop: Millimeter- and Sub-Millimeter-Wave circuit design and characterization*, 26 September 2014, pp. 1–15.

43. **Wojnowski M., Wagner C., Lachner R., Böck J., Sommer G., Pressel K.** A 77-GHz SiGe Single-Chip Four-Channel Transceiver Module with Integrated Antennas in Embedded Wafer-Level BGA Package, *2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference*, 29 May–1 June 2012, pp. 1027–1032.

44. **Hagelauer A., Wojnowski M., Pressel K., Weigel R., Kissinger D.** Integrated Systems-in-Package, *IEEE Microwave Magazine*, January/February 2018, pp. 48–56.

45. **Hamidipour A., Fischer A., Jahn M., Stelzer A.** 160-GHz SiGe-Based Transmitter and Receiver With Highly Directional Antennas in Package, *2013 8th European Microwave Integrated Circuits Conference Proceedings*, 2013, pp. 81–84.

46. **Stelzer A., Feger R.** Integrated microwave sensors in SiGe with antenna in package: From concepts to solutions. *2016 22nd International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECOM)*, 19–21 Sept. 2016, pp. 1–7.

47. **Henawy M., Schneider M.** Integrated Antennas in eWLB Packages for 77 GHz and 79 GHz Automotive Radar Sensors, *Proceedings of the 41st European Microwave Conference*, 2011, pp. 1312–1315.

48. **Zhu C., Wang Y., Duan Z., Dai Y.** Design of Patch Antenna in Embedded Glass Fan Out Package for 77-GHz Auto-

motive Radar, *2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 8–11 Dec. 2020, pp. 1066–1068.

49. **Zhu C., Duan Z.** Design of 94-GHz Wideband Waveguide-Feed Patch Antenna and Array in eWLB Package, *Proceedings of the 50th European Microwave Conference*, 12–14 January 2021, pp. 824–827.

50. **Yu T., Zhang X., Chen L., Ren X., Duan Z., Yu D.** Development of Embedded Glass Wafer Fan-Out Package With 2D Antenna Arrays for 77GHz Millimeter-wave Chip, *2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2020, pp. 31–36.

51. **Bhutani A., Bekker E., de Oliveira L. G., Pauli M., Zwick T.** 140 GHz Broadband Antenna in Embedded Wafer-Level Ball Grid Array Technology, *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 22–26 March 2021, pp. 1–5.

52. **Bhutani A., Göttel B., Lipp A., Zwick T.** Packaging Solution Based on Low-Temperature Cofired Ceramic Technology for Frequencies Beyond 100 GHz, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2019, vol. 9, no. 5, pp. 945–954.

53. **Zhang B., Gulan H., Zwick T., Li Y., Oderfalt U., Carlsson F., Zirath H.** Integration of a 140 GHz Packaged LTCC Grid Array Antenna With an InP Detector, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2015, vol. 5, no. 8, pp. 1060–1068.

54. **Hosono R., Uemichi Y., Hasegawa Y., Nakatani Y., Kobayashi K., Guan N.** Development of millimeter-wave devices based on liquid crystal polymer (LCP) substrate, *IEICE Electronics Express*, 2017, vol. 14, no. 20, pp. 1–13.

55. **Kärnfelt C., Coant P., Sinou M., Coupez J.-P., Bourreau D., Péden A.** Grooved Laminated Waveguide Devices for U-, V-, W- and G-band Applications, *Proceedings of the 45th European Microwave Conference*, 7–10 Sept 2015, pp. 777–780.

56. **Gottel B., Beer S., Pauli M., Zwick T.** Ultra Wideband D-Band Antenna Integrated in a LTCC based QFN Package using a Flip-Chip Interconnect, *Proceedings of the 43rd European Microwave Conference*, 7–10 Oct 2013, pp. 227–230.

57. **Chen Z. N., Qing X., Sun M., Yeap S. B., Liu W., Xu J., Hong W., Gong K.** Substrate-integrated Antennas at 60/77/140/270 GHz, *2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, 30 June–3 July 2015, pp. 281–282.

58. **Wu Y., Yu T., Zhang M., Yu D., Hirokawa J., Liu Q. H.** A W-Band Corporate-Fed Hollow-Waveguide Slot Array Antenna by Glass Micromachining, *2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 25–28 Jan. 2021, pp. 435–436.

59. **Zhu H. T., Xue Q., Hui J. N., Pang S. W.** A 750–1000 GHz H-Plane Dielectric Horn Based on Silicon Technology, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, vol. 64, no. 12, pp. 5074–5083.

60. **De Kok M., A. Smolders B., Johannsen U.** A Review of Design and Integration Technologies for D-Band Antennas, *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2021, vol. 2, pp. 746–758.

61. **Dyck A., Kuri M., Rosch M., Tessmann A., Ambacher O.** A Dielectric-Filled Cavity-Backed Lens-Coupled Dipole Antenna at 100 GHz, *2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, 20–23 Jan. 2019, pp. 1–3.

62. **Lacombe E., Giancesello F., Bisognin A., Luxey C., Titz D., Gulan H., Zwick T.** 240 GHz Antenna Integrated on Low-Cost Organic Substrate Packaging Technology Targeting High-Data Rate sub-THz Telecommunication, *Proceedings of the 47th European Microwave Conference*, 10–12 Oct 2017, pp. 164–167.

63. **Rösch M. A., Tessmann A., Leuther A., Kuri M., Wagner S., Ambacher O., Gulan H.** Compact W-band Receiver Module on Hybrid Liquid Crystal Polymer Board, *Proceedings of the 13th European Radar Conference*, 5–7 Oct 2016, pp. 370–373.

64. **Ravichandran S., Huang K.-Q., Rehman M., Erdogan S., Watanabe A., Nedumthakady N., Liu F., Kathaperumal M., Swaminathan M.** Packaging Approaches for mmWave and Sub-THz Communication, *2019 IEEE MTT-S International Microwave Conference on Hardware and Systems for 5G and Beyond (IMC-5G)*, 15–16 Aug. 2019, pp. 1–5.

65. **Shin W., Ku B.-H., Inac O., Ou Y. C., Rebeiz G. M.** A 108–114 GHz 4×4 Wafer-Scale Phased Array Transmitter With High-Efficiency On-Chip Antennas, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2013, vol. 48, no. 9, pp. 2041–2055.

66. **Ito M., Marumoto T.** Silica-Based Packaging Structure for D-band RF module, *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium- IMS*, 2018, pp. 871–874.

67. **Pham A. V. H., Laskar J., Krishnamurthy V. B., Cole H. S., Sitnik-Nieters T.** Ultra low loss millimeter wave multichip module interconnects, *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B*, 1998, vol. 21, no. 3, pp. 302–308.

68. **Tao Y.-X., Yang X., Zhang C.-R., Zhou L.** Design and Fabrication of W band Heterogeneous Integrated Transceivers, *2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, 20–23 Sept. 2020, pp. 1–3.

69. **Song S., Yoo C.-S., Kim D., Choi S., Park J.-C., Seo K.-S.** Development of Millimeter-wave Integrated Passives on MCM-D Technology with Thin-Film Microstrip Line, *2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 11–16 June 2006, pp. 952–955.

70. **Li S., Zhang R., Yi Z., Ding Y., Ren E., Yang G.** A Hybrid Beamforming-Based Transceiver with Antenna in Package for Millimeter-Wave Small Cell, *IEEE 4th International Conference on Electronics Technology*, 2021, pp. 748–751.

71. **Richter M. D., Becker K.-F., Böttcher L., Schneider M.** Interconnects for Buried W-Band MMICs Using Novel System-in-Package Technology, *2009 German Microwave Conference*, 16–18 March 2009, pp. 1–4.

72. **Manzillo F. F., Clemente A., Blampey B., Pares G., Siligaris A., González-Jiménez J. L.** Transmitarray Antenna with Integrated Frequency Multiplier for High-speed D-band Communications in Low-cost PCB Technology, *13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2019)*, 31 March–5 April 2019, pp. 1–4.

73. **Ginsburg B. P., Ramaswamy S. M., Rentala V., Seok E., Sankaran S., Haroun B.** A 160 GHz Pulsed Radar Transceiver in 65 nm CMOS, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2014, vol. 49, no. 4, pp. 984–995.

74. **Goettel B., Winkler W., Bhutani A., Boes F., Pauli M., T. Zwick T.** Packaging solution for a millimeter-wave system-on-chip radar, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 73–81.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ "НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА" В 2021 г.

Лучинин В. В., Мальцев П. П. Нанотехнологии в новом технологическом укладе № 1

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Лучинин В. В. Новый технологический уклад. Креативные технологии и "загоризонтные" профессии № 6

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Барулина М. А., Кондратов Д. В., Галкина С. А. Аналитическое решение уравнений движения чувствительного элемента наносенсора как прямоугольной свободно опертой нанопластины № 3

Деспотули А. Л., Андреева А. В. Наноионика — развивающаяся информационная система. Часть 3. Генерация прогностической информации и роль стратегического инновационного менеджмента в развитии наноионики № 1

Крупкин Е. И., Аверин И. А., Пронин И. А., Игошина С. Е., Карманов А. А. Квантово-размерные эффекты в нанокompозитах оксида цинка как основа для разработки газовых сенсоров нового поколения № 3

Ларионов Ю. В. Геометрия структур на основе анизотропного травления в нанодиапазоне № 3

Ларионов Ю. В. Эталонные структуры на основе анизотропного травления для нанометрологии. № 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Андреева Н. В., Лучинин В. В., Рындин Е. А., Аньчков М. Г., Романов А. А., Чигирев Д. А., Мазинг Д. С., Герасимова М. И., Севостьянов Е. Н., Трушлякова В. В., Демин Ю. А. Архитектура и технология нейроморфных мемристивных чипов. № 6

Койгеров А. С. Лестничные фильтры на вытекающих поверхностных акустических волнах на подложке ниобата лития № 3

Обухов И. А. Многокомпонентная модель переноса заряда в квантовых полупроводниковых приборах. № 1

Тимошенко С. П., Анчутин С. А., Зарянкин Н. М., Калугин В. В., Кочурина Е. С., Тимошенко А. С., Боев Л. Р. Проектирование и изготовление чувствительного элемента МЭМС-акселерометра № 2

Хлыбов А. И., Родионов Д. В., Пантелеев А. И., Тимошенко П. В., Гуминов Н. В. Моделирование тепловых процессов в мощных СВЧ транзисторах

на основе нитрида галлия для импульсного режима № 4

Хмельницкий И. К., Лучинин В. В., Гареев К. Г., Андреева Н. В., Бохов О. С., Тестов О. А., Айвазян В. М., Орехов Ю. Д., Мандрик И. В., Карелин А. М., Тестов Д. О., Парфенович С. Е. Облик и основные функциональные элементы интерактивной мультимодальной гибридной конформной микросистемы для оперативного трансдермального медико-биологического мониторинга и коррекции состояния организма № 6

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Александров П. А., Баранова Е. К., Бударрагин В. В., Литвинов В. Л. Размерный эффект в кремнии, облученном собственными ионами № 3

Глухова О. Е., Слепченко М. М., Барков П. В. Закономерности электропроводности монослойного наносетчатого графена с круглыми отверстиями № 5

Ильин В. А., Афанасьев А. В., Лучинин В. В., Чигирев Д. А., Серков А. В. Карбидокремниевые эпитаксиальные структуры для бета-вольтаических преобразователей № 6

Лаукарт В. И., Филин О. А., Кузнецов С. В., Степычев М. С. Метод вакуумной герметизации МЭМС-устройств с использованием нераспыляемого газопоглотителя № 5

Мандрик И. В., Старцев В. А., Бохов О. С., Пудова А. В., Лучинин В. В. Каплеструйная печатная технология изготовления сверхтонких гибких серебряно-цинковых аккумуляторов № 6

Мешеряков А. В., Сигаев А. П., Аверин И. А., Карманов А. А., Пронин И. А., Якушова Н. Д. Модификация адсорбционных свойств наноматериалов на основе оксида цинка и диоксида олова после дополнительной активации в плазме аргона. № 4

Мустафаева Д. Г. Улучшение термоэлектрических свойств материала и повышение эффективности процессов преобразования № 5

Ситков Н. О., Зимица Т. М., Лучинин В. В., Колотов А. А., Корляков А. В., Кострыкина А. А. Технология формирования гибридных микрофлюидных биосенсорных систем на основе молекулярного распознавания для безметочного флуориметрического экспресс-детектирования белковых структур № 6

Толочко Н. К. Применение аддитивных технологий для изготовления неэлектронных компонентов микросистем № 4

- Цветков Л. А., Пустовалов А. А., Бадун Г. А., Бу-
няев В. А., Вербецкий В. Н., Мандругин А. А., Ба-
ранов Н. Н.** Способы повышения удельной энер-
гоемкости бета-вольтаических атомных батарей на
основе трития № 5
- Юров В. М., Гончаренко В. И., Олешко В. С.**
Анизотропия поверхностной энергии и толщи-
ны поверхностного слоя магнитных нанострук-
тур № 2

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Kamaljeet Singh, Sharma S. V.** Thin Film Based Micro-
Machined Sensor Development and Mitigation of
Process Challenges № 1
- Алтухов А. А.** Сравнительные исследования детекторов
ионизирующих излучений, изготовленных на осно-
ве алмазных пластин различного типа № 2
- Алтухов А. А.** Радиоэлектронные модули и системы
контроля излучений на основе алмазных детекто-
ров № 5
- Борисенков И. Л., Воронов К. Е., Леонович Г. И., Ка-
лаев М. П., Телегин А. М.** Сенсорная система на
основе внутриволоконных брэгговских решеток и
интеррогатора со спектрально-временным разде-
лением каналов № 5
- Гнатюк Д. Л., Зуев А. В., Мальцев П. П.** Исследование
потерь пропускания в поликристаллическом CVD-
алмазе в диапазоне частот 40..80 ГГц № 5
- Лукичев В. Ф., Амиров И. И., Уваров И. В., Камран
Кешаварздивколаи, Воротынцев Д. А., Серегин Д. С.,
Воротилов К. А.** Изготовление и резонансные ха-
рактеристики PZT-кантилеверов № 5
- Масальский Н. В.** Синтез низковольтных логических
вентилей на КНИ КМОП-нанотранзисторах с
полностью охватывающим затвором № 2
- Михеев А. В., Анчутин С. А., Кочурина Е. С., Тимо-
шенков А. С.** Применение вариации Аллана для
оценки случайных погрешностей датчиков угло-
вой скорости № 3
- Мустафаева Д. Г.** Формирование эффективных мик-
ропленочных преобразователей с воспроизводи-
мыми параметрами № 3

- Пономарев Д. С.** Элементная база фотопроводящих
полупроводниковых устройств для генерации те-
рагерцового излучения № 2
- Рындин Е. А., Андреева Н. В., Лучинин В. В., Гонча-
ров К. С., Райимжонов В. С.** Нейроморфные функ-
циональные модули импульсной нейронной се-
ти № 6
- Ситков Н. О., Зимина Т. М., Лучинин В. В., Ко-
лобов А. А., Романов А. А., Орехов Ю. Д., Корля-
ков А. В., Рябко А. А., Нарецкая О. И., Кисе-
лева М. И., Кострыкина А. А.** Гибридно-интегри-
рованный биосенсор для экспресс-определения
белковых маркеров заболеваний на основе моле-
кулярного распознавания и прямого флюоримет-
рического детектирования № 6
- Хмельницкий И. К., Айвазян В. М., Алексеев Н. И.,
Бройко А. П., Лучинин В. В., Тестов Д. О.** Иссле-
дование ионных ЭАП-актюаторов с металличе-
скими и полимерными электродами в водной сре-
де № 1

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

- Кульчицкий Н. А.** Метод контроля атомных и моле-
кулярных пучков в молекулярно-лучевой эпита-
ксии № 1

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

- Лисицкий А. П., Мальцев П. П., Матвеев О. С.,
Михалев А. О., Трофимов А. А., Скрынский В. Р.**
Развитие апертурно- и емкостно-связанных ан-
тенн. Обзор № 4
- Лисицкий А. П., Мальцев П. П., Матвеев О. С.,
Михалев А. О., Трофимов А. А., Скрынский В. Р.**
Тенденции развития планарных излучающих сис-
тем миллиметрового диапазона длин волн. Моно-
поли и диполи. Обзор № 2

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

- Присянюк В. В., Прудников Н. В., Суворов И. С.,
Паршиков Б. Ю., Дюбанов М. В.** О высокотемпе-
ратурных гальванических элементах резервных ис-
точников тока на основе энергетических конденса-
рованных систем № 3

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.

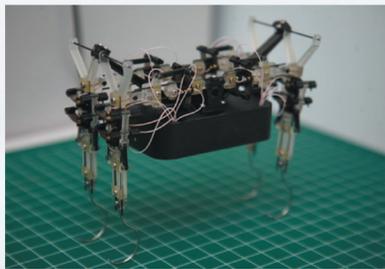
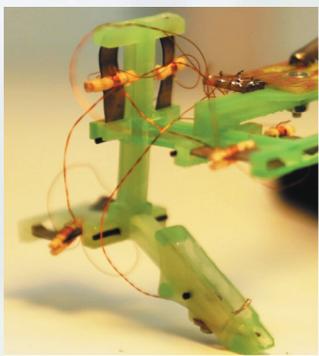
Сдано в набор 14.12.2021. Подписано в печать 21.01.2022. Формат 60×88 1/8. Заказ МС122. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Таблица к статье И. К. Хмельницкого, В. В. Лучинина, А. Н. Горляка, В. М. Айвазяна, Н. И. Алексеева, А. П. Бройко, Ю. Д. Орехова, А. М. Карелина, Д. О. Тестова

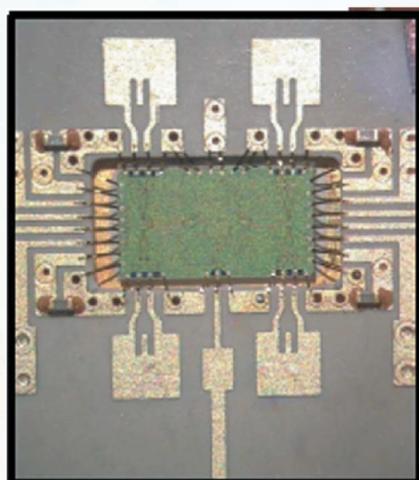
«КОМПЛЕКС МИНИАТЮРНЫХ БИОНИЧЕСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

Таблица 2

Шагающие биороботы с двигателями на основе ИПМК-актюаторов

Название	Изображение	Характеристики и особенности
«Конь»		<ul style="list-style-type: none"> • Размеры: 141 × 62,4 × 118 мм → мини-робот; • материал корпуса и основных компонентов приводов – АБС-пластик; • число «ног» – 4; • число ИПМК-актюаторов – 24; • масса – 70 г; • алгоритм движения – неадаптивный, «2+2»; • дистанционное управление – через Wi-Fi; • максимальная скорость – 1 мм/с; • время непрерывной работы на воздухе – 30 мин
«Жук»		<ul style="list-style-type: none"> • Размеры: 20 × 20 × 18,5 мм → микробот; • материал основных компонентов приводов – АБС-пластик; • число «ног» – 6; • число ИПМК-актюаторов – 12; • масса – 2 г; • алгоритм движения: неадаптивный, «3+3»; • максимальная скорость – 2 мм/с; • время непрерывной работы на воздухе – 30 мин
«Многоножка»		<ul style="list-style-type: none"> • Размеры: 182 × 88 × 101 мм → мини-робот; • материал корпуса и основных компонентов приводов – фотополимерная смола; • число «ног» – 6; • число ИПМК-актюаторов – 36; • масса – 190 г; • алгоритм движения: адаптивный, «3+3» и «2+4»; • дистанционное управление – через Wi-Fi; • максимальная скорость – 1,8 мм/с; • встроенный в «ногу» датчик касания на основе ИПМК-сенсора

Рисунки к статье А. П. Лисицкого, П. П. Мальцева, О. С. Матвеевко, А. О. Михалева, В. Р. Скрынского
«МЕТОДЫ СБОРКИ «СИСТЕМА-В-КОРПУСЕ»
В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН: СТРУКТУРЫ И МАТЕРИАЛЫ. Обзор»



а)

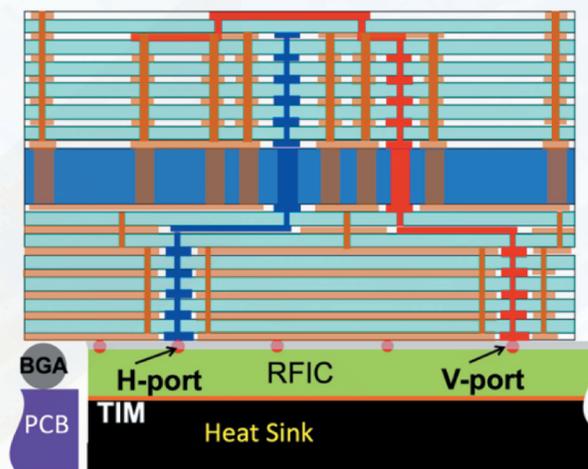
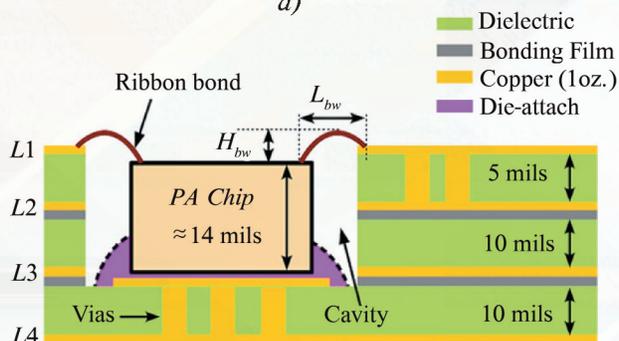


Рис. 10. Сечение интеропера типа 1 с многослойной антенной



б)

Рис. 6. Строение передатчика с антеннами:
 а – общий вид; б – сечение платы

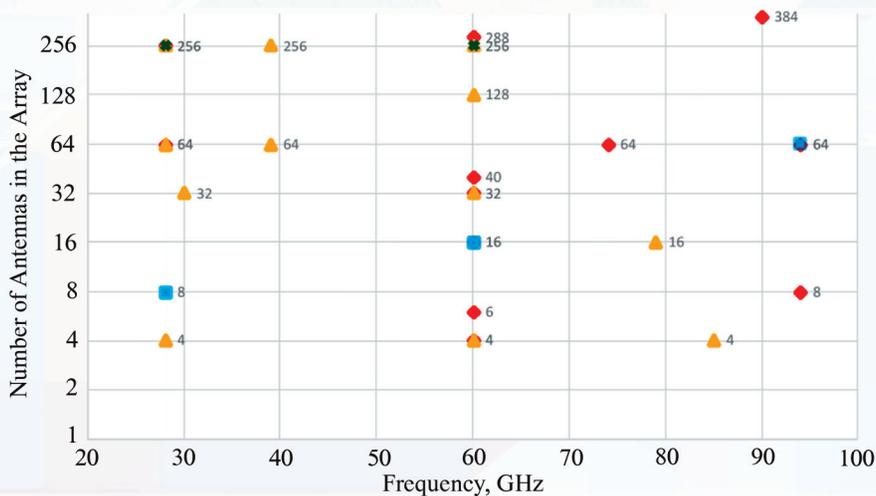


Рис. 31. Диаграмма рабочих частот интерпереров с различными диэлектриками:
 ♦ – Organic Laminate Package; ■ – LTCC; ▲ – PCB; ★ – Quartz on Silicon