

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 23, № 4, 2021



Рисунки к статье А. П. Лисицкого, П. П. Мальцева, О. С. Матвеевко, А.О. Михалева,
 А. А. Трофимова, В. Р. Скрынского
 «РАЗВИТИЕ АПЕРТУРНО- И ЕМКОСТНО- СВЯЗАННЫХ АНТЕНН. ОБЗОР»

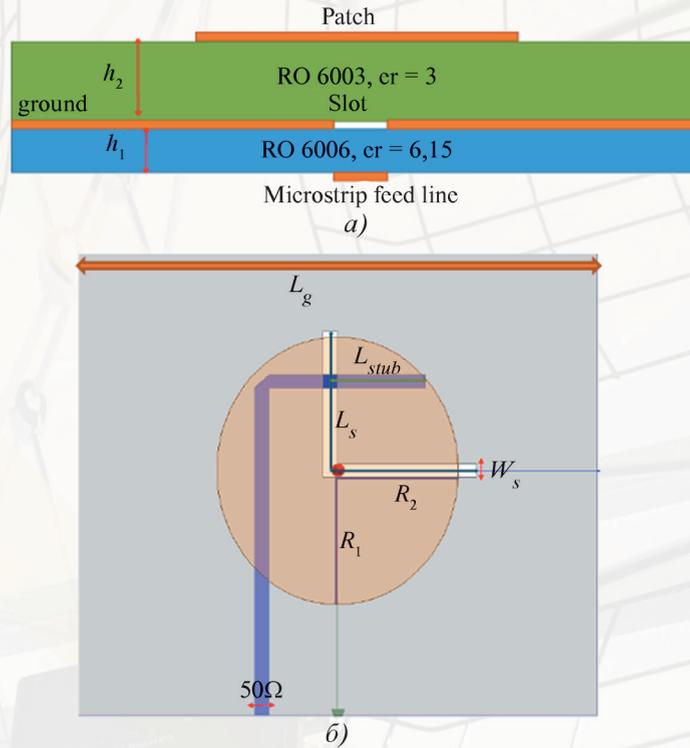


Рис. 1. Сечение (а) и топология (б) слоев реализации АСА

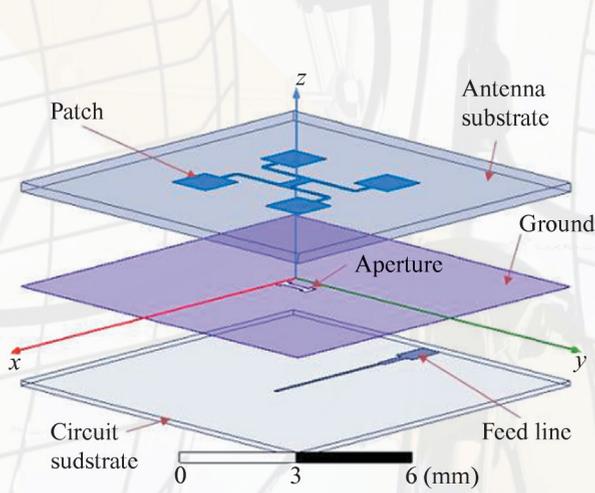


Рис. 2. АСА с четырьмя соединенными монополями

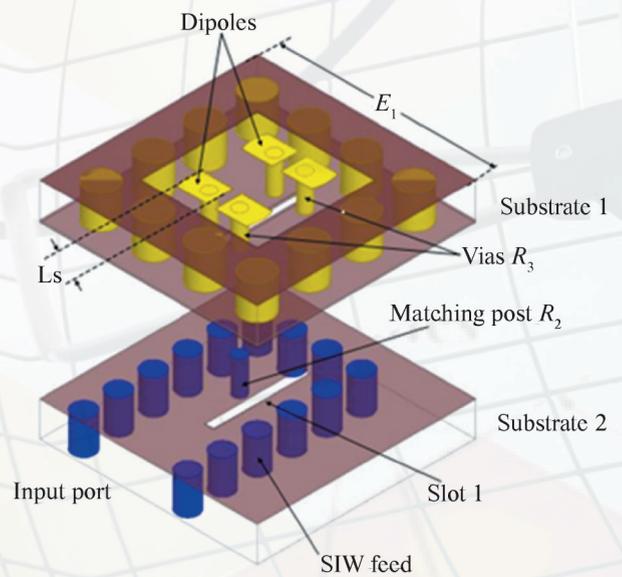


Рис. 12. Структура излучателя

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 23. № 4 ✧ 2021

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

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

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

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

Статьи имеют DOI

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

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

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

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

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

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

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.)

Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Ларионов Ю. В. Эталонные структуры на основе анизотропного травления для нанометрологии 171

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

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 179

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Мещеряков А. В., Сигаев А. П., Аверин И. А., Карманов А. А., Проппин И. А., Якушова Н. Д. Модификация адсорбционных свойств наноматериалов на основе оксида цинка и диоксида олова после дополнительной активации в плазме аргона 186

Толочко Н. К. Применение аддитивных технологий для изготовления неэлектронных компонентов микросистем 193

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 антенн. Обзор 201

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

ПОДПИСКА:

по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)

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

Адрес для переписки:

107076, Москва,

Стромынский пер., д. 4

e-mail: nmst@novtex.ru

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 23

No. 4

2021

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY CHIEF EDITOR

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

DEPUTY CHIEF EDITOR

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

Editorial council:

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

Editorial board:

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

Editorial staff:

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

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

CONTENTS

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

Larionov Yu. V. Etalon for Nanometrology Produced by Anisotropic Etching 171

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Khlybov A. I., Rodionov D. V., Pantelev A. I., Timoshenkov P. V., Guminov N. V. Simulation of Power RF GaN Transistors Thermal Parameters in Pulse Mode 179

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Meshcheriakov A. V., Sigaev A. P., Averin I. A., Karmanov A. A., Pronin I. A., Yakushova N. D. Modification of the Adsorption Properties of Nanomaterials Based on Zinc Oxide and Tin Dioxide after Additional Activation in Argon Plasma 186

Tolochko N. K. Application of Additive Technologies for Manufacturing Non-Electronic Components of Microsystems 193

SYSTEM ON A CHIP

Lisitsky A. P., Maltsev P. P., Matveenko O. S., Mikhalev A. O., Trofimov A. A., Skrinsky V. R. Development of Aperture and Capacitively Coupled Antennas. Review 201

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

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

УДК 537.533.35

DOI: 10.17587/nmst.23.171-178

Ю. В. Ларионов, ст. науч. сотр., luv@kapella.gpi.ru,
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

ЭТАЛОННЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ АНИЗОТРОПНОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ НАНОМЕТРОЛОГИИ

Поступила в редакцию 05.04.2021

Обсуждены возможности и результаты использования рельефных структур, созданных анизотропным травлением (АТ), в качестве эталонов для линейных измерений в нанодиапазоне. Рассмотрены два типа АТ-структур с разным профилем сечения и два подхода к оценке влияния степени их совершенства на данные измерений, а также различные результаты их использования. Структура с прямоугольным профилем сечения и средства ее измерения рекомендованы в качестве эталона для воспроизводства в национальных комитетах по метрологии линейных размеров в нанодиапазоне. Структура с профилем в виде трапеции оказалась слабо востребованной даже в национальном масштабе.

Ключевые слова: анизотропное травление, нанометрология, мера ширины, МШПС-2К, SCCDRM, IVPS-100-РТВ, АСМ, РЭМ, неопределенность измерений

Введение

Существует представление, что анизотропное травление (АТ) кристаллической пластины способно формировать на ней идеально плоскую и атомно-гладкую поверхность, для которой лишь отдельные атомы выступают над или утоплены в нее. Такая поверхность параллельна кристаллографической плоскости с минимальной скоростью травления и поэтому неровности на ней, ограненные другими плоскостями, легко удалить. С помощью АТ можно вытравить рельефную структуру с гладкими боковыми стенками, которые будут параллельны выделенной плоскости. Гладкие и плоские стенки способны пересекаться с другими плоскостями рельефной структуры по прямой линии и поэтому профиль такой АТ-структуры (структуры, созданной с помощью АТ) предстанет в виде совершенной геометрической фигуры, определяемой минимальным числом параметров. Такая совершенная АТ-структура может быть эталоном для ли-

нейных измерений в нанометрологии. Вопросом является реальная степень совершенства участков АТ-структуры и ее влияние на неопределенность их наноразмеров.

Возможность использования АТ-структур для нанометрологии реализовалась около 20 лет назад в двух подходах. На наш взгляд, подходы определились отношением к совершенству участков поверхности АТ-структур, а также к их влиянию на результат измерения. Задача работы — рассмотреть особенности реализации этих проектов и оценить итоги, к которым они привели нанометрологию.

Подходы к оценке нанорельефа АТ-структур

Наиболее удобным материалом для создания метрологических рельефных наноструктур является кристаллический кремний. Для него отработана технология создания структур с разными профилями сечения на основе АТ, исследована морфология неровностей поверхности кремние-

вых пластин, параллельных разным кристаллографическим плоскостям [1]. Формирование АТ-структур на основе кремния осуществляется относительно простым жидкостным травлением даже для наноразмеров.

Наиболее гладкая поверхность кремния с минимальной скоростью травления располагается параллельно кристаллографической плоскости [111] (далее поверхность [111]). В обоих обсуждаемых типах АТ-структур поверхность [111] формирует боковые стенки (БС), которые обеспечивают стабильность расстояния (ширины) между ними. Отношение к совершенству БС, а также выбор профиля АТ-структур определили методику и измерительные средства для их контроля.

Структура с трапецидальным профилем. В концепции измерений, представленной в неявном виде в работе [2], предполагается априорное совершенство АТ-структуры в наномасштабе. Участки профиля выступа прямолинейны и пересекаются под заданными углами. Между точками пересечения формируется равнобедренная трапеция. В положении всех этих точек потенциально отсутствует неопределенность, поэтому нужно лишь точно определить расстояния между ними. Эталон на основе такой АТ-структуры воспроизводит значения сразу нескольких величин, необходимых в наноэлектронике. Размеры участков связаны с размерами их проекций на плоскость пластины, поэтому методом измерения является микроскопия, формирующая увеличенное изображение этих проекций. Возможна проверка результатов измерений с использованием интерферометра.

Структура с прямоугольным профилем. Подход к контролю структуры складывается в целое фрагментами из разных публикаций (например [3, 4]). В концепции измерений реальный профиль не является совершенным в нано- и субнанометровом диапазоне размеров. Отклонения от совершенного профиля влияют на неопределенность измерения единственного параметра — расстояния между БС структуры. Поэтому число влияющих должно быть мало, их влияние на результат нужно учитывать. Так, участки профиля около верхнего и нижнего оснований исключены из контроля ввиду потенциального их несовершенства и возможного загрязнения. Ширина измеряется между точками БС на среднем по высоте участке профиля. Учитывается влияние на ширину шероховатости поверхности БС и степени их параллельности. Ширина задается усредненным расстоянием между множеством

соответствующих точек на срединных участках БС. Это множество располагается на ограниченных по размеру участках БС.

Для такого измерения ширины нужны средства прецизионного контроля глубинных участков БС с субнанометровой неопределенностью. Затруднено использование обычной микроскопии и лазерной интерферометрии для проведения измерений.

Измерение параметров структур с помощью микроскопа

Использовать эталоны удобнее так, как это осуществляется для топологических элементов наносхем. Ширину — основной их измеряемый параметр определяют как расстояние между границами верхнего основания (ВО) элемента. Размер измеряют по его изображению, формируемому в измерительных сканирующих атомно-силовых и электронных микроскопах (АСМ и РЭМ). Амплитуда сигнала в сканируемой строке формирует его видеопрофиль (ВП). Ширина элемента задается расстоянием между определенными (опорными) точками на краях этого ВП, положение которых должно точно соответствовать границам ВО измеряемого элемента. Это сложно установить, так как даже прецизионные микроскопы искажают изображение на краях элемента из-за того, что размер сканирующего зонда микроскопа сравним с краевыми участками этого элемента. В настоящее время создаются элементы наносхем с размерами менее 10 нм, поэтому неопределенность значения размера должна быть меньше нанометра. При этом размер зонда микроскопа составляет порядка 0,1...1 нм для РЭМ и 1...10 нм для АСМ. Искажение приводит к неопределенности в положении опорных точек на изображении.

Неопределенности размеров АТ-структуры при контроле ее с помощью микроскопа

Исключить неопределенность в положении опорных точек можно, рассчитав искаженный ВП с помощью модели построения изображения в микроскопе с учетом размера зонда и отметив на нем положение этих точек. Однако в расчетах обычно используется упрощенная модель профиля структуры и зонда микроскопа. Это приводит к модельной или методической неопределенности размера. Модельная неопределенность будет меньше для совершенной АТ-структуры

при совершенной форме зонда. В работе [5] дан пример оценки положения опорных точек ВП для АТ-структуры с трапециевидальным профилем при совершенном профиле зонда АСМ. Ситуация усложняется тем, что краевые участки профиля даже АТ-структур отличаются от краев идеальной трапеции. На них обнаружены закругления, которые не позволяют четко указать положение границ участков ВО [6]. Произвольный выбор границ ведет к дефинициальной [7] неопределенности ширины участков.

Геометрия взаимодействующих зонда и АТ-структуры со временем изменяется, поэтому необходимо их периодически поверять. Наиболее сложна поверка стабильности субнанометровых параметров зонда. Нестабильность возникает вследствие многократного взаимодействия одних и тех же его участков с поверхностью структуры. Отметим, что в результате сканирования возможна и модификация параметров контролируемой поверхности, которую необходимо отличить от модификации параметров зонда.

Оценку стабильности измерений проводят, поверяя размеры измеренных участков профиля с паспортными, полученными при использовании эталона длины. Для сопоставления паспортных значений с эталоном создают специальные средства измерений, обеспечивающие прослеживаемость результатов измерений к единице длины на эталоне. Саму АТ-структуру используют в качестве вторичного эталона. Сопоставление первичного эталона и вторичного для трапециевидальной АТ-структуры проводят устройством сравнения на основе АСМ.

Итоги создания АТ-структуры с наклонными БС

В 2002 г. в работе [2] была представлена мера ширины с трапециевидальным профилем, созданная с помощью анизотропного травления кремния. Реальная степень совершенства участков поверхности и углов в профиле такой АТ-структуры не была оценена на практике до создания меры. Поэтому считалось, что форма всех участков профиля этой АТ-структуры соответствует форме модельного профиля [2] и дефинициальная неопределенность отсутствует.

Влияние искажения профиля ВП на результаты измерений были исключены методически. Алгоритм измерений параметров трапеции демонстрирует рисунок, где показана схема сканирования зондом АСМ трапециевидного модельного профиля (слева — направо).

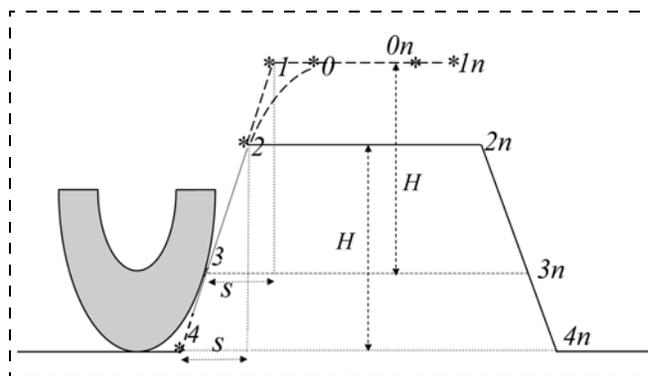


Схема сканирования АТ-структуры зондом АСМ (слева — направо). Точка 3 — место первого касания зондом левой БС; точка 2 — место последнего касания (соответствует излому прямой 2—3). Штриховая линия 1—2 экстраполирует прямую 2—3 до встречи с штриховым продолжением прямой 1—0, отображающей ВО. Участок кривой 0—2 соответствует следу перемещения зонда по угловой точке 2. Точка 0 — начало сканирования ВО нижней точкой зонда; точка 0* — конец сканирования. Точки 0n...4n соответствуют точкам 0...4 на правой половине профиля; H — высота выступа; S — ШПБС

Сигнал ВП наложен на профиль выступа в масштабе 1х. Форма профиля зонда в виде участка окружности определяется только радиусом закругления.

Для исключения искажений ВП [8] закругления на углах ВП заменили экстраполированными участками прямых, соответствующих ВО и БС, до пересечения последних. В результате создается вспомогательная модельная трапеция, форма которой подобна форме измеряемой (ее угловые точки обозначены как 3-2-1-0-0n-1n-2n-3n). При этом недоступная для измерения высота H между прямыми 2-2n и 4-4n определяется по расстоянию между прямыми 1-1n 3-3n. Значение ширины проекции БС (ШПБС) S, измеряемое вдоль прямой 4-4n между точками 2 и 4, может быть определено по расстоянию S вдоль прямой 3-3n между точками 1 и 3.

Высота выступа (расстояние между линией ВО и прямой 3-3n) — аналог шага для элементов топологии в плоскости пластины. Ее значение не изменяется при осаждении слоя загрязнения на пластину или при подтраве поверхностей ВО и НО. При заданном угле трапеции это значение позволяет вычислить такую же стабильную ШПБС. Ширина ВО равна расстоянию между точками 0 и 0n на правой и левой сторонах ВП. В этих точках кривой ВП участки окружности (2-0) и (0n-2n) соединяются с касательной к ним в виде участка ВО. Ширина НО рассчитывается как сумма ширины ВО и удвоенного значения ШПБС. Как видно, пред-

ложенный алгоритм позволил исключить все искажения изображения и вычислить все параметры трапеции.

Неопределенности измерений параметров АТ-структуры с наклонными БС. Из четырех параметров профиля выступа два (высота выступа и ширина ВО) измеряют по участкам модельной трапеции $3-1-1n-3n$ и два (ШПБС и ширина НО) — с помощью расчетов. Высокая точность измерений высоты и ширины ВО обусловлена измерениями расстояний между опорными точками ВП. По-видимому, это и позволило записать, что "...абсолютные погрешности измерения поверяемых параметров элементов рельефной структуры... не превышают 0,1 нм при условии использования... интерферометра" [8].

Но необходимо учесть и неопределенность положения самих опорных точек. На реальном профиле линия ВО отлична от прямой вследствие шероховатости и отклонений от нее в виде изгибов [6]. Высота шероховатости на поверхности [100], оцененная по ПЭМ-изображениям сечения выступов, составляет $\sim 0,5$ нм. В работе [6] на ПЭМ-изображении виден куполообразный изгиб линии ВО с высотой в $0,7...1$ нм. Изгиб приводит к дефинициальной неопределенности положения граничных точек ВО. По нашим данным, такие изгибы чаще случаются для выступов с шириной ВО менее 50 нм. Другое несовершенство профиля, выявленное в работе [6], — разная высота выступа с правого и левого его края, равная $5...10$ нм. Это приводит к нарушению параллельности между прямыми ВО и $3-3n$. Суммарная неопределенность значения высоты вследствие этих дефектов может быть около 10 нм, что почти на два порядка больше неопределенности измерения по линиям ВО и НО в работе [8].

ШПБС вычисляют и поэтому ее неопределенность примерно соответствует неопределенности высоты. Большая неопределенность связана с положением границ БС и границ проекций. Их сложно установить ввиду закруглений вблизи углов реального профиля трапеции и куполообразной формы ВО [6]. Закругления у углов трапеции сопровождаются искажением формы профиля в виде фаски или фески [6]. Хотя положение граничных (опорных) точек БС надежно устанавливается на кривой ВС (по точкам пересечения аппроксимированной линии БС с аппроксимированными прямыми ВО и НО), но соответствие между ними и угловыми точками на ВО реального профиля установить невозможно.

Но оказалось, что даже положение граничных точек БС на кривой ВП, определяемых пересечением аппроксимирующих прямых БС и ВО, имеет неопределенность. В работе [6] выяснили, что линия БС может отклоняться от аппроксимирующей ее прямой последовательностью ступенек около верхней границы БС. Поэтому значения верхних углов трапеции в профиле сечения могут отличаться от их номинальных значений. Значения углов в [6] оказались разными для левых и правых БС одного выступа. Поэтому разница в ШПБС для разных сторон трапеции достигла $6...8$ нм. В результате и положение границ БС на кривой ВС приобретает соответствующую неопределенность.

Неопределенности в положении граничных точек возникают и при измерении основной измеряемой величины — ширины ВО. Это происходит вследствие сложности выбора положения точек на кривой ВП, отделяющих плоские участки ВО от закруглений (точки 0 и $0n$ на рисунке). Положение граничной точки ВО на кривой ВП можно определить точнее, если его искать по производной к кривой ВП [5]. Однако уменьшения неопределенности в положении этой точки сложно достичь на практике ввиду шумов сигнала ВП АСМ, которые особенно заметны вблизи углов трапеции. В итоге неопределенность значений ширины ВО, измеренная даже по производной к кривой ВП, составила $\pm 4...6$ нм [5]. Ввиду закруглений на ее углах и куполообразного профиля ВО положение граничной точки ВО на кривой ВП также является модельным и для него сложно найти соответствующую точку на профиле структуры.

АТ-структура с наклонными БС была создана и использована при аттестации и поверки АСМ и РЭМ. Она известна как МШПС-2.0 К (мера ширины и периода специальная с периодом в расположении этих рельефных структур 2,0 мкм на кремниевой пластине) [8]. Мера можно использовать для работы в любых отраслях производства, но специализирована она для нанoeлектроники. Она является средством воспроизведения значения ширины ВО в диапазоне более 10 нм и высоты более 100 нм.

Как видно, одним из основных источников неопределенности в положении опорных точек является упрощение реально сложного профиля наноструктур в моделях расчета ВП. Вместе с тем большое число взаимосвязанных параметров меры МШПС-2К увеличивает влияние неопределенности одних параметров на неопреде-

ленность других. Поэтому возникает внимание к АТ-структуре с простым прямоугольным профилем сечения и к другому подходу уменьшения неопределенности измерений.

Средства измерения параметров профиля

Актуальной задачей является визуализация профиля структуры с разрешением деталей рельефа на изображении. Это достижимо с помощью специальных средств контроля.

ПЭМ (просвечивающий электронный микроскоп) используют после разрушения объекта контроля [3, 4]. Поэтому АТ-структуру вначале сканируют в РЭМ или АСМ, фиксируя ее ВП. Затем ее рассекают ионным пучком вдоль профиля сканирования и сечение помещают в ПЭМ, фиксируя изображение структуры. Поскольку она вытравлена в кристаллическом материале, то на ПЭМ-изображении вместе с деталями профиля у границ участков будут видны и атомы кристалла. Расстояние между выбранными границами участков на ПЭМ-изображении калибруют по числу атомных периодов в кристалле. Значение периода известно из высокоточных рентгеновских измерений до долей нанометра. Зная расстояние между границами структуры на ПЭМ-изображении и увеличение микроскопа, можно определить положение опорных точек на ВП для РЭМ или АСМ. Но разрушенную структуру нельзя использовать для повторного измерения на РЭМ и АСМ и поэтому невозможно оценить стабильность ее параметров во времени.

АСМ. Средство измерения, исходно используемое для контроля поверхности с мелким рельефом, было специализировано для измерения нанорельефа с резким изменением высоты профиля (**CD** — **Critical Dimension** — **AFM**). Это достигается использованием зонда с необычной формой профиля и усложненным алгоритмом его перемещения вдоль поверхности [9]. Форма профиля его концевой участка — аперкса имеет вид раструба (*flared tip*), "кепки" (*capped tip*) или диска, что позволяет сканировать его нитевидным боковым краем поверхность БС даже при "отрицательном" ее наклоне. Благодаря относительно толстому штоку и длинной краевой линии диска зонд имеет высокую износостойкость. Но сканировать им можно лишь отдельные стоящие выступы.

Такая специализация формы зонда делает невозможным сканирование слаборельефных, а также угловых участков поверхности структу-

ры, где резко меняется форма участков нанопрофиля. Для их контроля предложены острые зонды (с острием на аперксе) и со сложным управлением их движения. Они способны сканировать поверхность не только при нормальном расположении к ней оси зонда, но и при наклонном. Возможно динамичное изменение положения оси так, чтобы она во всех точках поверхности выступа была перпендикулярна к линии профиля. Вместо непрерывного касания поверхности зондом происходит его "векторное приближение" к ней и после ее касания в одной точке удаление от нее (**VAR**-метод [5]), и только затем перемещение зонда параллельно поверхности. Степень близости зонда к рельефной поверхности контролируют и при горизонтальном, и при вертикальном его смещении, для чего используют колебание штока зонда в двух перпендикулярных направлениях. Радиус аперкса лабораторных острых зондов может достигать 1 нм, что позволяет регистрировать вариацию рельефа на угловых участках выступа. Сканирование одного профиля проводят многократно с постепенным приближением к оптимальному варианту. Такие зонды слабо изнашиваются и демонстрируют высокую воспроизводимость измерений. Это дает возможность оценки стабильности измерений на аттестуемой структуре. Такие **CD-AFM** были в первую очередь предназначены и использованы для контроля АТ-структур с вертикальными БС.

Некоторые авторы видят большую перспективу использования АСМ для прецизионных измерений на поверхности. В работе [10] проведена оценка перспективности различных средств измерений линейных размеров для нанотехнологии и выражено убеждение, что микроскопы на основе сканирующего механического зонда (**СМЗ**) имеют потенциальные преимущества перед устройствами, которые используют в качестве зонда поток частиц. Преимущества существуют, во-первых, ввиду локальности контроля с помощью **СМЗ**. Так, аперкс зонда туннельного микроскопа способен взаимодействовать с отдельными атомами объекта контроля при возможности перемещения его от одного атома к другому, во-вторых, вследствие низкой энергии взаимодействия зонда с частицами поверхности. В пучковых методах контроля избыточная энергия падающих частиц зонда способна приводить к изменению заряда поверхности, формированию потока вторичных и отраженных частиц из

глубины, что искажает поток частиц, формирующего изображение.

Однако размер обычного зонда АСМ также является препятствием к контролю размеров рельефных структур. Поэтому еще недавно более предпочтительным средством измерений наноструктур назывался РЭМ. Как видно, оптимизация формы зонда и алгоритма его перемещения позволяют АСМ в определенных условиях контролировать детали профиля специальных рельефных структур, которые еще недавно можно было контролировать только с помощью ПЭМ.

Реализация концепции измерений для АТ-структуры с вертикальными БС

В начале века по инициативе и при участии национального бюро стандартов и технологий США (NIST) были созданы и исследованы АТ-структуры в качестве стандартного образца (СО) [3]. Они были названы SCCDRM (*Single Crystal Critical Dimension Reference Material*), формировались из кристаллического кремния и представляли собой выступы с прямоугольным профилем сечения. Поверхность пластины и ВО лежали в плоскости [110]. Предназначался SCCDRM лишь для измерения радиуса зонда АСМ, т. е. в более узкой области использования по сравнению с мерой МШПС-2К.

СО SCCDRM — один из объектов реализации программы NIST по использованию природных констант для метрологии [9]. Расстояние между БС выступа SCCDRM измерялось по ПЭМ-изображению профиля структуры с учетом толщины оксидного слоя на БС. Ширина кремниевой части АТ-структуры и толщина оксидной пленки определяются в единицах периода кремниевой решетки. Для визуализации внешней границы АТ-структуры на ее поверхность наносили тонкий слой платины. Положение внешней границы выбирали посередине переходной области между слоями платины и оксида кремния. Расстояние усредняли по площади выбранных участков поверхности БС и поэтому оно имело малую неопределенность.

Первые выступы SCCDRM имели значения ширины от 50 до 240 нм, измеренные с расширенной неопределенностью ($2k$) 1,5...2 нм. В наше время первичный стандарт (*master standart*) имеет неопределенность всего 0,6 нм. В 2015 г. совместными усилиями РТВ и Team-Nanotec (Германия) был создан эталон IVPS-100-РТВ (*Improved Vertical Parallel Structure*), подобный

SCCDRM [4]. В РТВ были созданы также средства измерений, которые позволили аттестовать этот эталон с помощью просвечивающего микроскопа.

Убедительную оценку значения неопределенности измерений ширины АТ-структур продемонстрировали результаты сравнения размеров меры IVPS-100-РТВ национальными метрологическими службами — NIST и РТВ [11]. Каждая из них использовала национальную эталонную базу и средства измерений для оценки неопределенности. Ширина АТ-структур в группе составляла от ~40 до ~130 нм. Неопределенность результатов измерения ширины в этой группе по данным NIST — 0,6 нм ($K = 2$), по данным РТВ — 1,3 нм. Усредненная разница размеров ширины между данными РТВ и NIST составила 0,76 нм. Результаты сличения этого эталона убеждают, что измерения размеров рельефных структур с атомной неопределенностью реальны.

Заключение

Развитие нанометрологии привлекло внимание к АТ-структурам (создаваемых анизотропным травлением) с потенциально плоскими участками поверхности и профилем сечения в виде идеальных геометрических фигур, которые могли стать эталонами при контроле линейных размеров. В соответствии с требованиями к ним неопределенность значений их размеров должна находиться в субнанометровом диапазоне, но достижению этого мешают несовершенства их поверхности. Их учет проведен по-разному при создании мер на основе АТ-структур с разным профилем сечения.

Мера МШПС-2.0К является АТ-структурой с трапециевидальным профилем [8]. Этот профиль априорно считается идеальным, поэтому размеры структуры определяются расстоянием между положением его угловых точек. Их положение фиксирует зонд атомно-силового микроскопа, который также имеет идеальный профиль в виде полуокружности. Создана модель видеопрофиля АСМ, формируемого при сканировании модельной структуры модельным зондом. Модель ВП позволяет указать положение опорных точек на кривой ВП, точно соответствующих угловым точкам идеальной трапеции. Единственным источником неопределенности размеров является измерение положения опорных точек на кривой ВП. Поэтому измерения всех участков трапеции проводят с "...допуска-

емой абсолютной погрешностью измерения, не превышающей 0,1 нм..." при использовании поверенного интерферометра [8].

В работе [6] выявлено несколько типов несовершенств реального профиля с локальным отклонением от идеального трапецеидального профиля от долей до нескольких нанометров. Несоответствие реального профиля структуры идеальному модельному приводит к нарушению соответствия положения опорных точек на кривой ВП угловым точкам модельного профиля. Более того, положение опорных точек на кривой ВП может быть вообще не связано с какими-либо точками реального профиля. Поэтому сложно оценить значение неопределенности измерения параметров профиля АТ-структуры. По нашему убеждению, оно находится в нанометровом диапазоне (до 5...7 нм).

В концепции измерения АТ-структуры с прямоугольным профилем SCCDRM определяли единственный параметр — ее ширину. Модель структуры предельно проста, при этом влияние на ширину несовершенств нанорельефа учитывали с этапа проектирования меры. Для контроля ширины и учета влияния нанорельефа был использован просвечивающий электронный микроскоп, визуализирующий детали профиля структуры. Методическая простота и высокое разрешение ПЭМ позволили достичь неопределенности результата измерений ширины выступа в 0,7 нм (2δ) при учете влияния несовершенств профиля структуры [11]. Прослеживаемость результата измерений к эталону длины была обеспечена через значение периода в расположении атомов в кристаллической решетке кремния.

В настоящее время АТ-структуры с прямоугольным профилем типа SCCDRM и средства их аттестации созданы уже в двух странах. Международное бюро мер и весов рекомендовало этот тип

АТ-структуры и средства его аттестации для воспроизводства в национальных комитетах по метрологии линейных размеров в нанодиапазоне [12].

Список литературы

1. **Gosalvez M. A., Nieminen R. M.** Surface morphology during anisotropic wet chemical etching of crystalline silicon // *New Journal of Physics*. 2003. N. 5. P. 100.1—100.28.
2. **Волк Ч. П., Горнев Е. С., Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Прохоров А. М., Раков А. В.** Линейная мера микронного и нанометрового диапазонов для измерений размеров элементов СБИС на растровых электронных и атомно-силовых микроскопах // *Микроэлектроника*. 2002. Т. 31, № 4. С. 243—262.
3. **Dixon R. G., Allen R. A., Guthrie W. F., Gresswell M. W.** Traceable calibration of critical-dimension atomic force microscope linewidth measurements with nanometer uncertain // *J. Vac. Sci. Technol.* 2005. B23. P. 3028—3032.
4. **Dai G., Zhu F., Heidelvann et al.** Development and characterization of a new line width reference material // *Measur. Sci. Technol.* 2015. Vol. 26, N. 11. P. 1—15.
5. **Новиков Ю. А., Раков А. В., Тодуа П. А.** Прямое измерение ширины линии на атомно-силовом микроскопе // *Измерительная техника*. 2008. № 5. С. 10—12.
6. **Ларионов Ю. В.** Геометрия структур на основе анизотропного травления в нанодиапазоне // *Нано- и микро-системная техника*. 2021. Т. 23, № 3. С. 131—138.
7. **Международный** словарь по метрологии. Основные понятия и соответствующие термины. Санкт-Петербург. НПО "Профессионал", 2010. 81 с.
8. **Меры** рельефные нанометрового диапазона с трапецеидальным профилем элементов. Методика поверки. ГОСТ Р 8.629.2007. М.: Стандартинформ, 2007.
9. **Vorburger T. V., Allen R. H., Damazo B. et al.** Nanomanufacturing of Atom-Based Dimension standards // *NISTIR*. 6850. US Dep. of Commerce, 2002.
10. **Ukrainsev V., Banke B.** Review of reference metrology for nanotechnology: significance, challenges and solutions // *J. of Micro/nanolithography*. 2012. Vol. 11 (011010). P. 1—9.
11. **Dai G., Nahm K., Bosse H., Dixon R. G.** Comparison of line width calibration using critical dimension atomic force microscopes between PTB and NIST // *Meas. Sci. Technol.* 2017. Vol. 28. 065010 (pp.).
12. **Dixon R., Bosse H.** Recommendations of CCL/WG-N on: Realization of SI metre using silicon lattice and Transmission Electron Microscopy for Dimensional Nanometrology. Version 1CCL-GD-MeP-2, 30/04/2019.

Yu. V. Larionov, Ph. D., Senior Researcher, A. M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Science, Moscow, luv@kapella.gpi.ru

Corresponding author:

Yu. V. Larionov, Ph. D., Senior Researcher, A. M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Science, Moscow, luv@kapella.gpi.ru

Etalon for Nanometrology Produced by Anisotropic Etching

*Received on April 05, 2021
Accepted on April 26, 2021*

Possibilities and results of using relief structures produced by anisotropic etching as etalons for linear measurements in nanorange are discussed. Two types of the structures with different profiles and with two approaches to estimation of influence of its sophistication degree on measurement results are considered. Analyze of methods and means of measurements of its geometric parameters and comparison of uncertainty of measurement results are conducted. The important condition for diminishing the measurements uncertainty is taking into account irregularities of a sample surface. These irregularities were evaluated by TEM and CD-AFM.

Results of harnessing these types of structures are different also. The bureau International des Poids et Mesures recommended the structure with rectangular profile and its attestation procedure as an example for all national committees on linewidth metrology in nanorange. The structure with trapezoid profile that induced hopes for decision of basic tasks of nanometrology in past is occurred to be poorly in demand even on national scale.

Keywords: anisotropic etching, nanometrology, linewidth measure, MShPS-2.0 K, SCCDRM, AFM, SEM, measurement uncertainty

For citation:

Larionov Yu. V. Etalon for Nanometrology Produced by Anisotropic Etching, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 171–178.

doi: 10.17587/nmst.23.171-178

References

1. Gosalvez M. A., Nieminen R. M. Surface morphology during anisotropic wet chemical etching of crystalline silicon, *New Journal of physics*, 2003, no. 5, pp. 100.1–100.28.

2. Volk Ch. P., Gornev E. S., Novikov Yu. A., Ozerin Yu. V., Plotnikov Yu. I., Prokhorov A. M., Rakov A. V. Lineiniya mera mikronnogo i nanometrovogo diapazonov dlya izmerenii razmerov elementov SBIS na rastrovikh, elektronnikh i atomno silovikh mikroskopakh, *Mikroelektronika*, 2002, vol. 31, no. 4, pp. 243–262 (in Russian).

3. Dixon R. G., Allen R. A., Guthrie W. F., Gresswell M. W. Traceable calibration of critical-dimension atomic force microscope linewidth measurements with nanometer uncertain, *J. Vac. Sci. Technol.*, 2005, B23, pp. 3028–3032.

4. Dai G., Zhu F., Heidelvann et al. Development and characterization of a new line width reference material, *Measur. Sci. Technol.*, 2015, vol. 26, no. 11, pp. 1–15.

5. Novikov Yu. A., Rakov A. V., Todua P. A. Pryamoe izmerenie shirini linii na atomno silovom mikroskope, *Izmeritelnyaya tekhnika*, 2008, no. 5, pp. 10–12 (in Russian).

6. Larionov Yu. V. Geometry of Structures Developed by Anisotropic Etching in the Nanometer Range, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 131–138 (in Russian).

7. Medzdunarodnii slovar' po metrologii. Osnovnie ponyatiya i sootvetstvuyushchie termini. Sankt-Peterburg, NPO Professional, 2010. 81 p. (in Russian).

8. Meri rel'efnie nanometrovogo diapazona s trapetseidalnim profilom elementov. Metodika poverki. GOST R8.629.2007. Moscow, Standatrinform. 2007 (in Russian).

9. Vorburger T. V., Allen R. H., Damazo B. et al. Nanomanufacturing of Atom-Based Dimension standards, *NISTIR 6850*, US Dep. of Commerce, 2002.

10. Ukraintsev V., Banke B. Review of reference metrology for nanotechnology: significance, challenges and solutions, *J. of Micro/nanolithography*, 2012, vol. 11 (011010), pp. 1–9.

11. Dai G., Hahn K., Bosse H., Dixon R. G. Comparison of line width calibration using critical dimension atomic force microscopes between PTB and NIST, *Meas. Sci. Technol.*, 2017, vol. 28, pp. 065010.

12. Dixon R., Bosse H. Recommendations of CCL/WG-N on: Realization of SI metre using silicon lattice and Transmission Electron Microscopy for Dimensional Nanometrology. Version ICCL-GD-MeP-2 30/04/2019.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ MNST MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.38:621.3.049.77:621.382.049.77

DOI: 10.17587/nmst.23.179-185

А. И. Хлыбов, канд. техн. наук, науч. сотр., alex1818@yandex.ru,
Д. В. Родионов, вед. инженер, denis.rodionov@gmail.com,
А. И. Пантелеев, студент, qwerto934@mail.ru, **П. В. Тимошенко**, инженер, cator@yandex.ru,
Н. В. Гуминов, вед. инженер, gummi.qdn@gmail.com,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Национальный исследовательский университет МИЭТ"

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МОШНЫХ СВЧ ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА

Поступила в редакцию 09.04.2021

Представлены результаты исследований тепловых процессов в мощных СВЧ GaN транзисторах на кремниевой подложке в импульсном режиме. Исследование тепловых процессов осуществлялось с помощью компьютерного моделирования для периодического импульсного режима. Авторами разработана методика, позволяющая существенно снизить требования к вычислительным ресурсам. В процессе исследования получены зависимости максимальной температуры в канале транзистора и теплового сопротивления от длительности импульса источника питания при постоянной скважности. Представлены результаты исследования тепловых процессов в мощных СВЧ GaN транзисторах с общей шириной затвора 2,1 мм, работающих в импульсном режиме.

Ключевые слова: СВЧ, GaN, HEMT, тепловое моделирование, тепловое сопротивление, field-plate, мощные полевые транзисторы, импульсный режим, скважность

Введение

Появление полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе нитрида галлия (GaN) существенно расширило возможности для создания СВЧ приборов высокой мощности. Уже сейчас получены транзисторы, работающие в S-диапазоне, с выходной мощностью в импульсном режиме до 1000 Вт [1]. Значительные успехи также достигнуты для C- и X-диапазонов (до 400 Вт в импульсном режиме), что практически недостижимо для технологий на кремнии и арсениде галлия. Однако высокая плотность мощности вызывает проблемы с рассеянием теплоты. Саморазогрев в канале тран-

зистора является фактором, серьезно ограничивающим надежность приборов. В технических условиях на изделия в кристалльном исполнении производитель указывает максимально допустимую рабочую температуру в канале, которая для транзисторов на основе GaN составляет 200 °С.

Нитрид галлия является полупроводником с широкой запрещенной зоной, что позволяет использовать более высокое напряжение питания (50 В против 32 В у LDMOS). Это, в свою очередь, дает возможность достичь больших значений плотности мощности и тем самым обеспечить снижение емкости на единицу выходной мощности. Данное обстоятельство позволяет из-

готовлять более высокочастотные транзисторы при сравнимых значениях мощности. Кроме того, повышенное напряжение питания означает более высокое сопротивление нагрузки, что упрощает конструкцию цепей согласования. Однако высокая плотность мощности вызывает проблемы с рассеиванием теплоты. Надежность транзисторов зависит от максимальной рабочей температуры канала. Поэтому для работы изделия при более высоких температурах необходимо уменьшать тепловое сопротивление канал транзистора — внешний теплоотвод, чтобы обеспечить температуру в канале меньше допустимой.

Тепловое сопротивление определяется как разность между максимальной температурой в канале транзистора и температурой основания подложки, отнесенная к выделяемой тепловой мощности. Как правило, мощные транзисторы используют в выходных усилителях, работающих в импульсном режиме, для обеспечения максимальных значений выходной мощности радиосигнала. Поэтому для прогнозирования эксплуатационных характеристик необходимо знать тепловой режим транзистора во время переходного процесса в зависимости от параметров нестационарного воздействия. Периодический импульсный режим характеризуется длительностью импульса t_i , периодом повторения T и их отношением $Q = T/t_i$, называемым скважностью. При постоянном значении средней тепловой мощности, определяемой как $P_{cp} = P/Q$ (P — тепловая мощность во время действия импульса), температура в канале транзистора будет зависеть от длительности импульса питания. При постоянной скважности температура в канале транзистора возрастает с увеличением длительности импульсов и стремится к температуре стационарного режима. Для коротких импульсов температура в канале транзистора

будет соответствовать температуре стационарного режима с тепловой мощностью $P_{cp} = P/Q$ (квази-стационарный режим).

Тепловые процессы при импульсном режиме характеризуются переходным тепловым сопротивлением R_T и тепловой постоянной времени τ , определяющими процессы разогрева и охлаждения при включении и выключении электрической мощности. Постоянная времени определяется теплоемкостью C_V и тепловым сопротивлением R_T :

$$\tau = C_V R_T. \quad (1)$$

Переходное тепловое сопротивление при включении определяется из выражения

$$R_T(t) = R_T(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (2)$$

а при выключении из выражения

$$R_T(t) = R_T e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3)$$

где R_T — тепловое сопротивление, соответствующее стационарному режиму.

Объект исследования

В работе в качестве объекта исследования выбран мощный СВЧ GaN полевой транзистор на кремниевой подложке. Топология и основные размеры транзистора приведены на рис. 1. Транзистор представляет собой секцию из шести параллельно соединенных транзисторов с шириной затвора 350 мкм, при этом общая ширина затворов составляет 2100 мкм. Контакт к истоку осуществляется с обратной стороны кристалла через переходные отверстия в областях истока. Для сохранения высокого коэффициента усиления и повышения частотного диапазона транзисторы в секции должны быть расположены как можно ближе друг к другу. В рассматриваемой конструкции транзистора расстояние между затворами в секции составляет 64 и 87 мкм, что меньше толщины утоненного кристалла, поэтому при тепловом анализе необходимо учитывать влияние саморазогрева соседних транзисторов.

Исследование данного объекта в стационарном режиме описано авторами в работе [2].

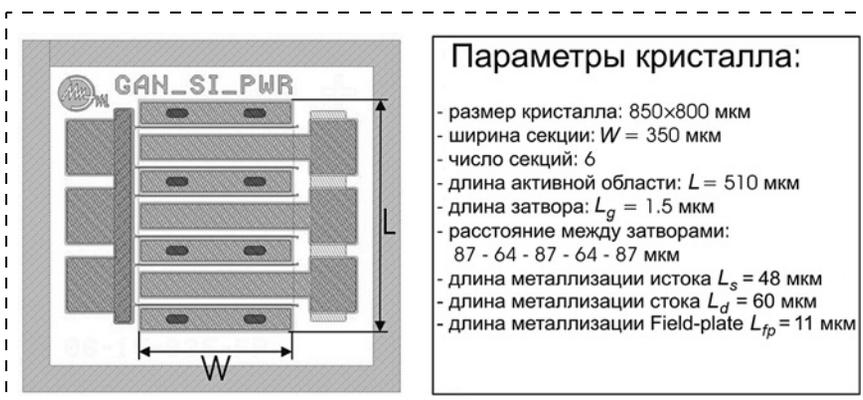


Рис. 1. Топология кристалла транзистора и основные топологические размеры, используемые в тепловой модели

Методика и результаты исследования

Исследование тепловых процессов в транзисторе осуществляли путем компьютерного моделирования. При моделировании тепловых режимов предполагали, что кристалл смонтирован на медную пластину размерами $5 \times 5 \times 1,5$ мм, на обратной стороне которой обеспечивается постоянная температура 60°C . Кристалл крепят к медной пластине с помощью тонкого слоя теплопроводящего материала AuSn (80/20) толщиной 12 мкм. С учетом теплопроводности AuSn, равной $57 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, тепловое сопротивление контактного слоя (R_{TK}) составляет $2,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2\text{К}/\text{Вт}$. Для задания граничных условий на остальных внешних поверхностях моделируемой структуры и расчета конвекционных потоков температуру окружающей среды также принимали равной 60°C . Физические параметры используемых материалов приведены в табл. 1.

При моделировании учитывали температурную зависимость теплопроводности и теплоемкости для нитрида галлия и кремния. Теплопроводность и теплоемкость меди и золота считали постоянными, так как в диапазоне температур $350 \dots 500 \text{ К}$ они изменяются не более чем на $3 \dots 4 \%$. Также не учитывали температурную зависимость для слоя Si_3N_4 ввиду его малой толщи-

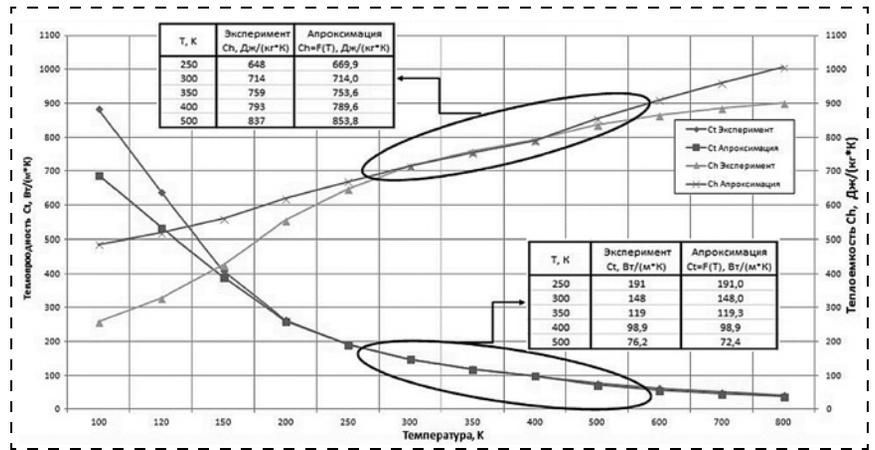


Рис. 2. Температурные зависимости теплопроводности и теплоемкости кремния

ны. Аналитические выражения для температурной зависимости теплопроводности GaN взяты из работы [3], а теплоемкость считали постоянной. Аналитические выражения для Si получены путем аппроксимации экспериментальных данных [4]. Из рис. 2 видно, что температурные зависимости теплопроводности и теплоемкости кремния в соответствии с предложенными выражениями хорошо согласуются с экспериментом в диапазоне температур $250 \dots 500 \text{ К}$.

Сечение моделируемой структуры с указанием толщины слоев показано на рис. 3.

Толщины слоев в элементах конструкции транзистора приведены в табл. 2.

Моделирование проводили для периодического импульсного режима, в котором средняя мощность определяется как $P_{\text{cp}} = P/Q$.

Через некоторое время после включения мощности тепловые процессы устанавливаются и в дальнейшем тепловая картина будет повторяться с частотой следования импульсов питания. При этом на определенном расстоянии от источника теплоты температура практически не меняется и соответствует температуре для непрерывного режима при тепловой мощности P_{cp} . Таким образом можно выделить изотермическую поверхность, температура которой практически не будет изменяться.

Таблица 1
Физические параметры используемых материалов ($T = 300 \text{ К}$)

| Материал | Теплопроводность C_T , Вт/(м·К) | Удельная теплоемкость C_H , Дж/(кг·К) | Плотность ρ , кг/м ³ |
|-------------------------|-----------------------------------|---|--------------------------------------|
| GaN | $130 \cdot (300/T)^{1,42}$ | 490 | 6070 |
| Si | $148 \cdot (300/T)^{1,40}$ | $714/(300/T)^{0,35}$ | 2329 |
| Cu | 400 | 384 | 8960 |
| Au | 317 | 129 | 19 300 |
| Si_3N_4 | 20 | 700 | 3100 |

Таблица 2

Толщины слоев используемых материалов в элементах конструкции транзистора

| Материал | Обозначение | Толщина слоя, мкм |
|--|------------------|-------------------|
| GaN (Нитрид галлия) | d_{GaN} | 2,0 |
| Si (Кремний) | d_{Si} | 98,0 |
| Gate (Золото) | d_G | 1,0 |
| Si_3N_4 (Нитрид кремния) | d_{SiN} | 0,3 |
| Field-plate (Золото) | d_{fp} | 1,0 |
| Source-Drain (Золото) | d_{SD} | 4,0 |
| Heat-sink (Медь) | d_{Cu} | 1500 |

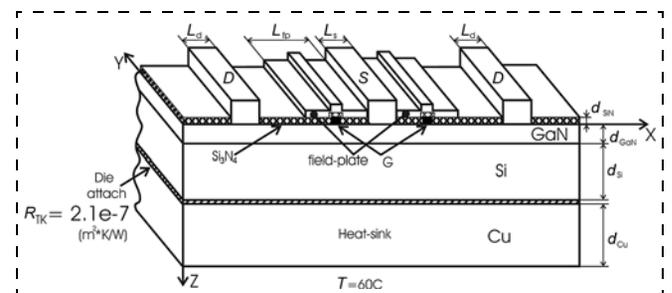


Рис. 3. Сечение моделируемой структуры

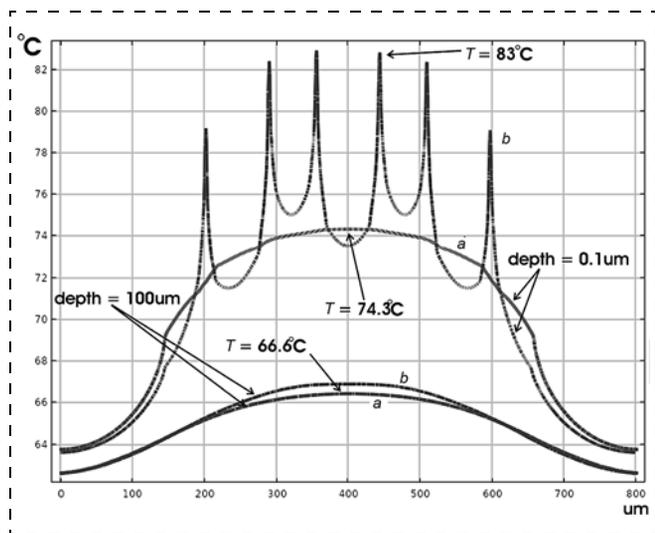


Рис. 4. Температурные профили вдоль структуры транзистора на глубине 0,1 и 100 мкм при плотности рассеиваемой мощности 1 Вт/мм:

a — источник теплоты с равномерным распределением, *b* — с локальными источниками теплоты

Результаты моделирования для стационарного режима показывают, что при одинаковой мощности температурный профиль на расстоянии, большем, чем расстояние между локальными источниками теплоты (расстояние между затворами), совпадает с температурным профилем для источника теплоты с равномерным распределением по всей поверхности активной области (рис. 4).

Разность температур между источником теплоты с равномерным распределением и выбранной изотермической поверхностью определяется из выражения

$$\Delta T_0 = R_T \frac{P}{Q}, \quad (4)$$

где R_T — тепловое сопротивление выбранной области.

Во время действия импульса питания разность температур (ΔT_1) между источником теплоты и изотермической поверхностью будет определяться переходным тепловым сопротивлением R_i :

$$R_i = R_T \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (5)$$

где t_i — длительность импульса, тогда

$$\Delta T_1 = PR_T \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \quad (6)$$

Приравнявая ΔT_0 и ΔT_1 , находим длительность импульса, при котором температура будет соответствовать температуре изотермической

поверхности для стационарного режима с мощностью тепловыделения P_{cp} :

$$t_i = \tau \ln \left(\frac{Q}{Q-1} \right), \quad (7)$$

где $\tau = R_T C_V$, где $C_V = V \rho C_H$ теплоемкость области объемом V , ограниченной выделенной изотермической поверхностью.

Для корректного выбора изотермической поверхности необходимо соблюдение следующего условия:

$$\tau > \frac{t_i}{\ln \left(\frac{Q}{Q-1} \right)}. \quad (8)$$

Тогда при моделировании тепловых процессов можно ограничиться объемом внутри выбранной изотермической поверхности, что значительно снизит требования к вычислительным ресурсам. Исходя из этого, предложена следующая методика.

На первом этапе для исследуемой конструкции проводят моделирование тепловых полей для непрерывного режима с тепловой мощностью $P_{cp} = P/Q$. Далее выбирают изотермическую поверхность таким образом, чтобы соблюдалось условие (8), рассчитывают тепловое сопротивление между источником теплоты и выбранной изотермической поверхностью:

$$R_H = \frac{(T_H - T_i)}{P_{cp}}, \quad (9)$$

где T_H — температура источника теплоты, определенная при моделировании в непрерывном режиме; T_i — температура изотермической поверхности.

Одним из начальных условий при моделировании является фиксация постоянной температуры, равной T_i , на границе выделенной области, что значительно упрощает процесс моделирования.

В исследуемой конструкции транзистора в качестве изотермической поверхности выбрана поверхность, проходящая по границе раздела кремниевая подложка — контактный слой (рис. 5, *a*, *b*). Из рисунка видно, что в первом приближении область, ограниченную данной поверхностью, можно аппроксимировать прямоугольным параллелепипедом размерами $450 \times 510 \times 100$ мкм.

Для удельной тепловой мощности 5 Вт/мм и скважности $Q = 5$ выбранной изотермической поверхности соответствует температура $T_i = 66,6$ °C, а определенная для непрерывного режима $T_H = 74,3$ °C (см. рис. 4). Тогда тепловое сопротив-

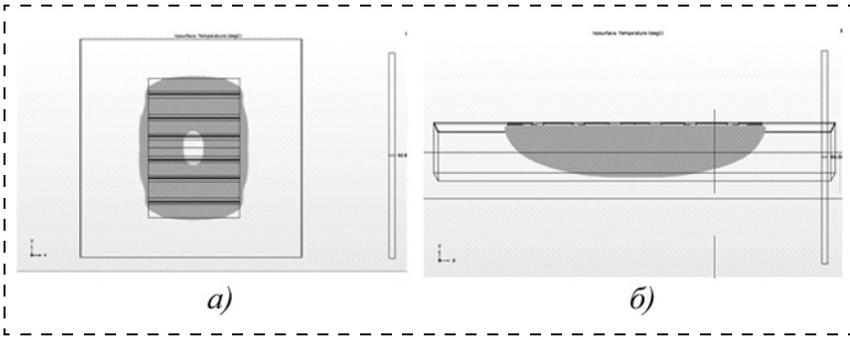


Рис. 5. Формы области, ограниченной изотермической поверхностью:
 а — в плоскости $x-y$; б — в плоскости $y-z$

ление $R_H = (T_H - T_i)/P_{cp} = 3,7$ К/Вт. Теплоемкость выбранной области определяется из выражения $C_V = V\rho C_H$, где V — объем выбранной области; ρ — удельная плотность материала в выбранной области. Учитывая, что в данном случае основным материалом является кремний, при дальнейших расчетах будем использовать физические параметры только этого материала. Определим тепловую постоянную времени из выражения $\tau = C_V R_H = V\rho C_H R_H = 510 \cdot 450 \cdot 100 \times 10^{-18} \cdot 2329 \cdot 714 \cdot 3,7 = 1,41 \cdot 10^{-4}$ с = 141 мкс.

Из выражения (7) получаем значение для максимальной длительности импульса t_i , соответствующее области, ограниченной выбранной изотермической поверхностью, $t_i < 31,4$ мкс.

На втором этапе выделяется наиболее горячая центральная часть транзисторной структуры из двух транзисторов, где источниками теплоты являются области под затворами длиной 1,5 мкм и шириной 350 мкм на глубине 0,1 мкм, остальная часть структуры моделируется тепловым источником, равномерно распределенным по площади активной области, не относящейся к выбранным двум транзисторам. Это также позволяет существенно уменьшить требования к вычислительным ресурсам [5].

Для определения минимального числа импульсов, после следования которых можно считать процесс установившимся, предлагается использовать следующий подход. Количество тепловой энергии ΔE , запасенной в выделенной области, соответствует в среднем энергии для стационарного процесса с мощностью P_{cp} :

$$\Delta E = C_V \frac{\Delta T}{2}, \quad (10)$$

где ΔT — разность температур между выбранной изотермической поверхностью и источником теплоты для стационарного режима с мощностью P_{cp} .

Учитывая, что энергия импульса равна $P \cdot t_i$, находим число импульсов N :

$$N = \frac{\Delta E}{P t_i} = \frac{C_V \Delta T}{2 P t_i}. \quad (11)$$

В работе проведено исследование теплового режима для импульсов длительностью 5, 10, 20 и 30 мкс при скважности $Q = 5$. В процессе моделирования определяли максимальную температуру в канале при изменении длительности импульсов.

Результаты моделирования для длительности импульса 10 мкс показаны на рис. 6. Из рисунка видно, что начиная с третьего импульса максимальная температура практически не меняется и соответствует установившемуся режиму ($T_{max} = 115,9$ °С), что хорошо согласуется с результатами, полученными из выражения (11).

Зависимости максимальной (T_{max}) и минимальной (T_{min}) температуры в канале транзистора от длительности импульса приведены на рис. 7. Эти зависимости отражают разнонаправленные процессы. При уменьшении длительности импульса T_{max} и T_{min} стремятся к максимальной температуре в канале, соответствующей стационарному процессу с $P_{cp} = P/Q$.

Зависимость теплового сопротивления R_t исследуемой структуры (см. рис. 3) от длительности импульса при постоянной скважности $Q = 5$ приведена на рис. 8. Тепловое сопротивление R_t определяли из выражения

$$R_t = \frac{(T_{max} - 60 \text{ °C})}{P}. \quad (12)$$

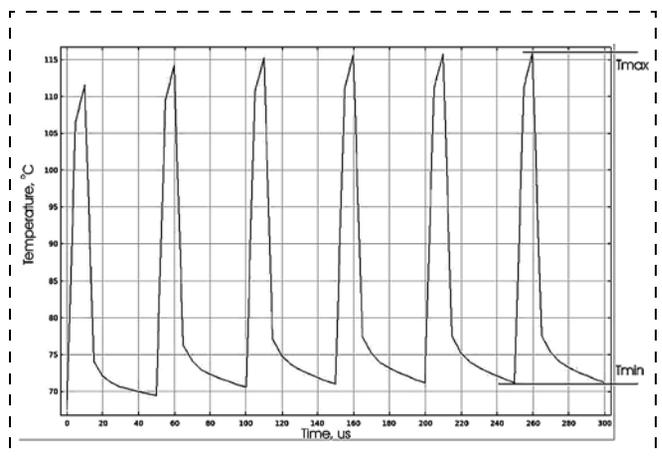


Рис. 6. Изменение температуры в канале транзистора от времени при длительности импульсов 10 мкс и скважности $Q = 5$

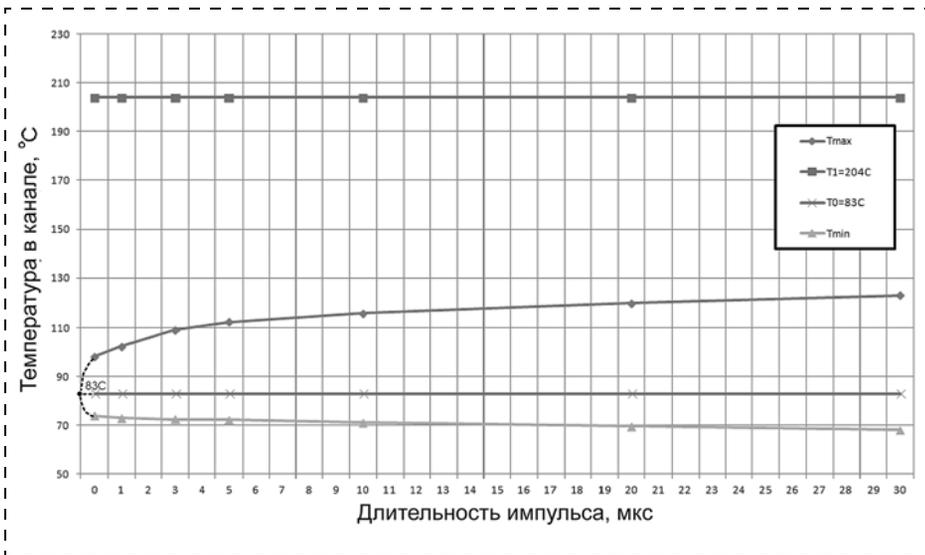


Рис. 7. Зависимость максимальной (T_{\max}) и минимальной (T_{\min}) температуры в канале транзистора от длительности импульса: $T_1 = 204^\circ\text{C}$ и $T_0 = 83^\circ\text{C}$ — максимальные температуры в канале транзистора для стационарного режима при мощности $P = 5$ Вт/мм и $P/Q = 1$ Вт/мм соответственно

Минимальное значение теплового сопротивления при длительностях импульсов $t_i \rightarrow 0$ определяется из выражения (12) при $T_{\max} = T_0 = 83^\circ\text{C}$ и составляет 2,1 К/Вт.

Наиболее быстрый рост теплового сопротивления происходит при изменении длительности импульса до 10 мкс, в дальнейшем зависимость приобретает практически линейный характер. Максимальное значение теплового сопротивления 13,1 К/Вт достигается при $t_i \rightarrow \infty$ и соответствует стационарному режиму с $P = 5$ Вт/мм и $T_{\max} = T_1 = 204^\circ\text{C}$.

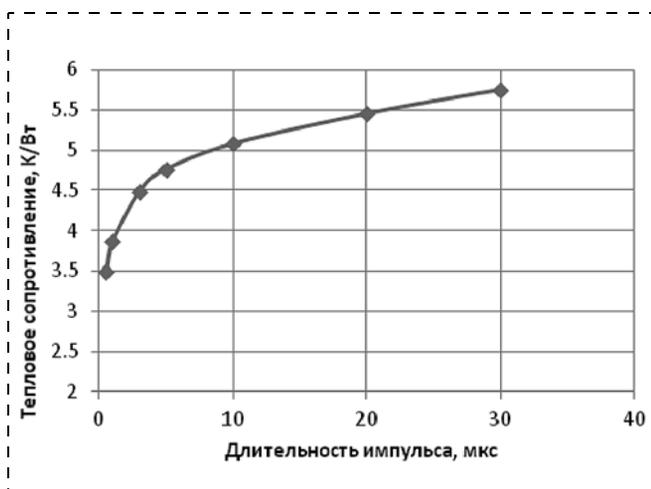


Рис. 8. Зависимость теплового сопротивления (R_t) исследуемой структуры от длительности импульса при постоянных скважности $Q = 5$ и мощности в импульсе $P = 5$ Вт/мм

Заключение

Увеличение выходной мощности СВЧ монолитных ИМС на GaN сопровождается повышением плотности компоновки активных элементов и, как следствие, повышением как значения, так и плотности рассеиваемой мощности. Поэтому при проектировании таких изделий все более важное значение приобретает исследование тепловых режимов работы транзисторов.

В работе на основе компьютерного моделирования проведены исследования мощных СВЧ GaN-транзисторов в импульсном режиме.

Предложена методика моделирования, позволяющая существенно снизить требования к вычислительным ресурсам. Проведены исследования зависимости максимальной температуры в канале транзистора и теплового сопротивления от длительности импульса источника питания для плотности рассеиваемой мощности 5 Вт/мм и скважности $Q = 5$.

Показано, что для исследуемого транзистора наиболее быстрый рост теплового сопротивления происходит при изменении длительности импульса до 10 мкс, в дальнейшем зависимость приобретает практически линейный характер. При изменении длительности импульса от $t_i \rightarrow 0$ до $t_i \rightarrow \infty$ тепловое сопротивление меняется от 2,1 до 13,1 К/Вт. Максимальное значение теплового сопротивления достигается при длительности импульса $t_i \rightarrow \infty$ и соответствует стационарному режиму с $P = 5$ Вт/мм при $T_{\max} = T_1 = 204^\circ\text{C}$, а минимальное значение — при длительности импульса $t_i \rightarrow 0$ и соответствует стационарному режиму с $P_{\text{ср}} = P/Q = 1$ Вт/мм при $T_{\max} = T_0 = 83^\circ\text{C}$.

Полученные в работе результаты исследований достигнуты в ходе реализации проекта НИУ МИЭТ с использованием мер государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

Название проекта НИУ МИЭТ "Разработка технологии и технологическая подготовка к производству кристаллов транзисторов на основе гетероструктур нитрида галлия на подложке кремния диаметром 150 мм для силовых преобразовательных модулей". Соглашение № 075-11-2019-068 от 26 ноября 2019 г."

Список литературы

1. Walkker J., Formicome G., Boueri F., Battaglia B. D. GaN-транзистор Integra Technologies с выходной мощностью 1 кВт для радарных применений S-диапазона // Компоненты и технологии. 2014. № 1. С. 84—87.

2. Тимошенко В. П., Хлыбов А. Н., Родионов Д. В., Пантелеев А. И., Гуминов Н. В. Исследования влияния элементов конструкции мощных СВЧ GaN-транзисторов на их тепловой режим // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 8. С. 415—421.

3. Belkacemi K., Hocine R. Efficient 3D-Modeling and Simulation for the Thermal Management of Microwave Al-GaN/GaN HEMT Used in High Power Amplifiers SSPA // Journal of Low Power Electronics and Applications. 2018. Vol. 23, no. 8. P. 1—19; doi: 10.3390/jlpea8030023.

4. Шелудяк Ю. Е., Кашпоров Л. Я. Теплофизические свойства компонентов горючих систем. Справочник. М.: НПО Информ ТЭИ, 1992. 29 с.

5. Timoshenkov V., Khlybov A., Rodionov D., Panteleev A. Thermal Phenomena Research in RF GaN Dies // IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2020 ElConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 27—30 Jan. 2020, pp. 2327—2330.

A. I. Khlybov, Ph. D., Senior Scientist, alex1818@yandex.ru,
D. V. Rodionov, Engineer, denis.rodionov@gmail.com,
A. I. Panteleev, Student, qwerto934@mail.ru, P. V. Timoshenkov, Engineer, cator@yandex.ru,
N. V. Guminov, Senior Engineer, gummi.qdn@gmail.com,
National Research University of Electronic Technology, Moscow, Zelenograd

Corresponding author:

Rodionov Denis V., Engineer, National Research University of Electronic Technology, Moscow, Zelenograd
E-mail: denis.rodionov@gmail.com

Simulation of Power RF GaN Transistors Thermal Parameters in Pulse Mode

Received on April 09, 2021

Accepted on 2021

This paper contains research results of thermal process in power GaN RF transistor in silicon substrate for pulse mode. Thermal mode research was done using computer simulation. Authors developed methodic allows significant decrease computational complexity. The dependences of maximum transistor channel temperature and thermal resistance as function of pulse width (with constant duty cycle) were done. Thermal simulation was done for power GaN RF transistor with overall gate width 2.1 mm.

Keywords: RF, GaN, HEMT, thermal simulation, thermal resistance, field-plate, power MOSFET

For citation:

Khlybov A. I., Rodionov D. V., Panteleev A. I., Timoshenkov P. V., Guminov N. V. Simulation of Power RF GaN Transistors Thermal Parameters in Pulse Mode, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 179—185.

doi: 10.17587/nmst.23.179-185

References

1. Walkker J., Formicome G., Boueri F., Battaglia B. D. GaN-transistor Integra Technologies s vyhodnoy moshnost' u 1 kVt dlya radarnykh primeneniy S-diapazona, *Komponenty i tehnologii*, 2014, no. 1, pp. 84—87.

2. Timochenkov V. P., Khlybov A. N., Rodionov D. V., Panteleev A. I., Guminov N. V. Issledovaniya vliyaniya elementov konstruktsii moshnykh SVCh GaN-transistorov na ih templovoy regim, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 8, pp. 415—421.

3. Belkacemi K., Hocine R. Efficient 3D-Modeling and Simulation for the Thermal Management of Microwave AlGaIn/GaN

HEMT Used in High Power Amplifiers SSPA, *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 2018, vol. 23, no. 8, pp. 1—19; doi: 10.3390/jlpea8030023

4. Sheludyk U. E., Kashporov L. Ya. Teplofizicheskie svoystva komponentov goruchih sistem. Spravochnik. Moscow, NPO Inform TEI, 1992, 29 p.

5. Timoshenkov V., Khlybov A., Rodionov D., Panteleev A. Thermal Phenomena Research in RF GaN Dies, *Proc. of the 2020 IEEE Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2020 ElConRus)*, 27—30 Jan., 2020, pp. 2327—2330.

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

УДК 620.3

DOI: 10.17587/nmst.23.186-192

А. В. Мешеряков, магистрант, **А. П. Сигаев**, аспирант,
И. А. Аверин, д-р техн. наук, проф., зав. каф., e-mail: nano-micro@mail.ru,
А. А. Карманов, канд. физ.-мат. наук, доц., **И. А. Пронин**, д-р техн. наук, проф.,
Н. Д. Якушова, ст. преподаватель,
ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет", г. Пенза, Россия

МОДИФИКАЦИЯ АДСОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА И ДИОКСИДА ОЛОВА ПОСЛЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ АКТИВАЦИИ В ПЛАЗМЕ АРГОНА

Поступила в редакцию 17.03.2021

Исследована модификация адсорбционных свойств наноматериалов на основе ZnO и SnO₂, синтезируемых золь-гель методом, после дополнительной активации их поверхности плазмой в среде аргона. Установлена корреляция между адсорбционными свойствами и фотокаталитической активностью. Показано, что при высоких мощностях источника плазмы и/или длительности активации наблюдается деградация структуры наноматериалов, что подтверждается данными растровой электронной микроскопии, а как следствие этого ухудшение их фотокаталитических свойств.

Ключевые слова: наноматериалы, золь-гель технология, оксид цинка, диоксид олова, активация в плазме аргона

Введение

Установлено, что применение иерархических наноматериалов для разработки фотокатализаторов является одним из перспективных направлений увеличения фотокаталитической активности [1–2]. Использование иерархических структур позволяет повысить эффективность поглощения светового излучения, улучшить молекулярный транспорт и диффузию за счет имеющейся системы пористых сетей, являющихся каналом для эффективного переноса молекул реагентов, кроме того, они обладают увеличенной удельной площадью поверхности. Актуальной проблемой в данной области является разработка простого и недорогого способа изготовления наноструктурированных иерархических фотокатализаторов с высокой степенью кри-

сталличности. При этом в зависимости от параметров первичных нанообъектов, а также от синергетически-кооперативных эффектов, возникающих при их объединении в иерархический наноматериал, изменяются не только каталитические и фотокаталитические свойства, но и адсорбционные и газочувствительные.

Методика эксперимента

В настоящей работе исследовали модификацию адсорбционных свойств наноматериалов на основе ZnO и SnO₂, синтезируемых золь-гель-методом, после дополнительной активации их поверхности плазмой аргона. Актуальность настоящего исследования определяется методикой улучшения фотокаталитических свойств данных

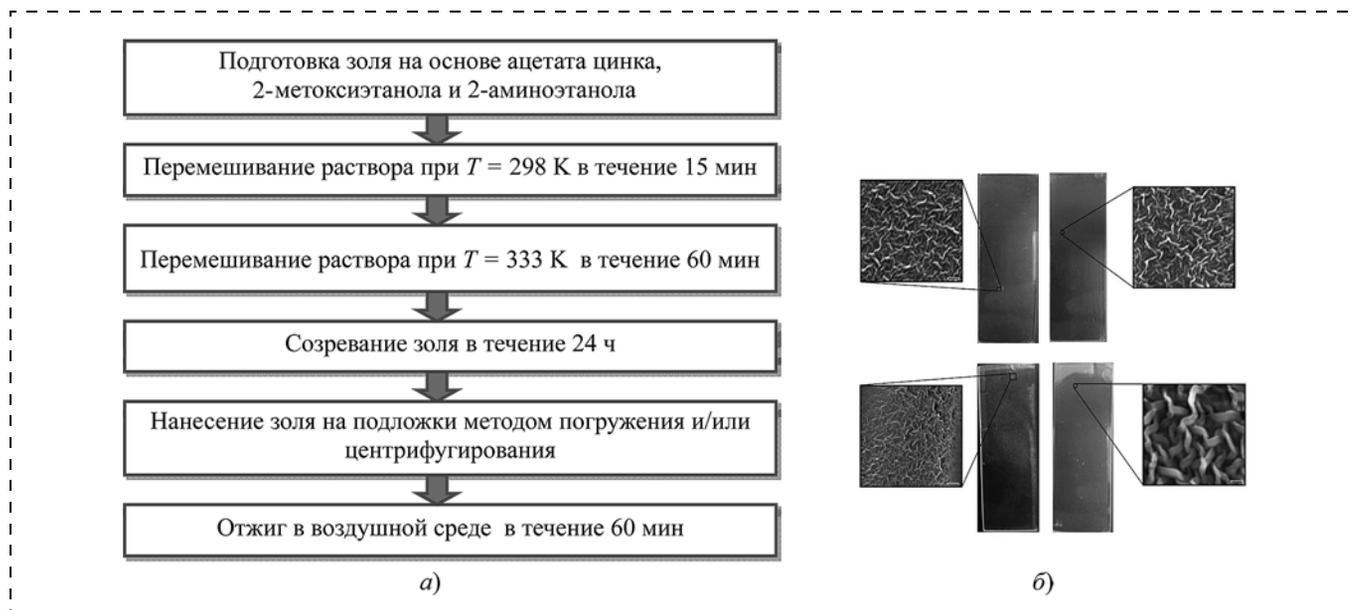


Рис. 1. Синтез в рамках золь-гель технологии иерархических наноматериалов на основе оксида цинка:
a — схема методики синтеза; *b* — образцы наноматериалов и структура их поверхности без дополнительной активации

наноматериалов, а также их практическим применением как в области фотокатализа [3, 4], так и в области газовой сенсорики [5, 6].

В качестве объекта исследования были использованы:

1) иерархические наноматериалы на основе оксида цинка, синтезированные в рамках золь-гель технологии в соответствии с разработанной ранее методикой [7], которая представлена схематично на рис. 1, *a*. С учетом дополнительной активации поверхности образцов потоком заряженных частиц синтез наноматериалов осуществлялся на стеклянных подложках (рис. 1, *b*, изображение с использованием иллюстративного масштаба);

2) иерархические наноматериалы на основе диоксида олова, синтезированные в рамках золь-гель технологии в соответствии с разработанной ранее методикой [8], которая представлена схематично на рис. 2, *a*.

Согласно данной методике с использованием тетраэтоксисилана формируется диэлектрическая матрица, в которую встроены кластеры полупроводниковых оксидов. С учетом дополнительной активации поверхности образцов потоком заряженных частиц синтез наноматериалов также осуществлялся на стеклянных

подложках (рис. 2, *b*, изображение с использованием иллюстративного масштаба);

3) иерархические наноматериалы на основе диоксида олова и оксида цинка, поверхность которых была подвергнута дополнительной активации плазмой. Обработку образцов наноматериалов на основе полупроводниковых оксидов проводили с использованием установки травления в индуктивно-связанной плазме. Энергию и интенсивность взаимодействия заряженных частиц с поверхностью контролировали по значению мощности источника индуктивно-связанной плазмы, которую задавали в интервале 100...1200 Вт.

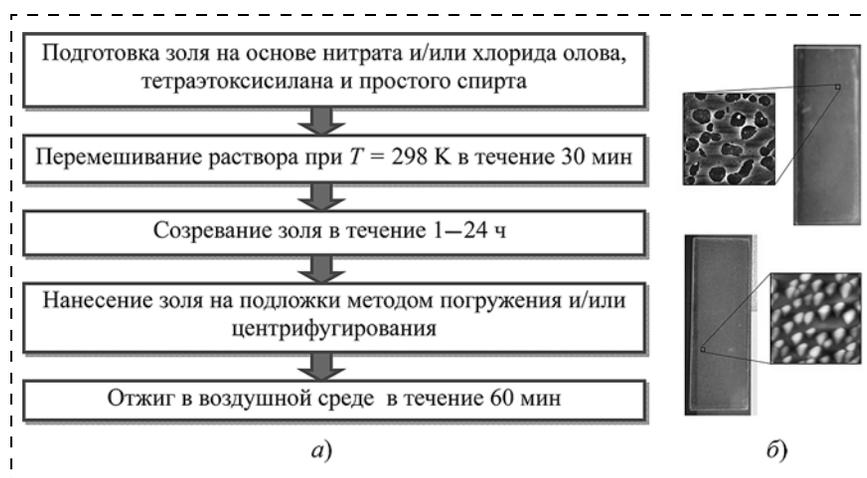


Рис. 2. Синтез в рамках золь-гель технологии иерархических наноматериалов на основе диоксида олова в матрице из диоксида кремния:
a — схема методики синтеза; *b* — образцы наноматериалов и структура их поверхности без дополнительной активации

Образцы наноматериалов на основе полупроводниковых оксидов до и после дополнительной активации исследовали методом адсорбции кислотно-основных индикаторов. Основным исследуемым параметром при анализе кислотной силы активных центров на поверхности твердофазных систем является pK_a . Если адсорбция наблюдается, то центрам приписывают кислотную силу, соответствующую молекуле индикатор-адсорбата, т. е. $pK_{ц} = pK_{ind}$ ($pK_{ц}$ — кислотная сила центра; pK_{ind} — кислотная сила индикатора). В процессе исследований для определения типа и концентрации поверхностных центров, отвечающих основаниям и кислотам Льюиса и Бренстеда, использовали выборочный набор индикаторов со значениями pK_a в диапазоне $-4,4...17,2$ (табл. 1).

Таблица 1

Кислотно-основные индикаторы, используемые для определения типа и концентрации поверхностных центров наноматериалов с иерархической структурой

| № | Кислотно-основные индикаторы | Кислотная сила, pK_a |
|----|------------------------------|------------------------|
| 1 | 2,4-динитротолуол | 17,2 |
| 2 | Этиленгликоль | 14,2 |
| 3 | Индигокармин | 12,8 |
| 4 | Нильский голубой А | 10,5 |
| 5 | Тропиолин 000 | 8,25 |
| 6 | Бромтимоловый синий | 7,2 |
| 7 | <i>n</i> -нитрофенол | 7,15 |
| 8 | Нитразиновый желтый | 6,5 |
| 9 | Хризодин | 5,5 |
| 10 | Бромфеноловый синий | 3,9 |
| 11 | Метиловый оранжевый | 3,46 |
| 12 | Метанитроанилин | 2,5 |
| 13 | Фуксин (основание) | 2,1 |
| 14 | Бриллиантовый зеленый | 1,3 |
| 15 | Кристаллический фиолетовый | 0,8 |
| 16 | О-нитроанилин | -0,3 |
| 17 | Динитроанилин | -4,4 |

Исследование адсорбционных свойств

При фотометрическом анализе локальной кислотности для определения числа центров адсорбции данной кислотной силы (pK_a) для выбранного индикатора готовили три рабочих раствора:

— раствор № 1 для "холостого опыта" — измерения величины T_0 (пропускание раствора индикатора до сорбции). В мерную пробирку емкостью 5...10 мл отбирали нужный объем стандартного раствора индикатора и доводили дистиллированной водой до заданного объема. В этом растворе измеряли пропускание индикатора в отсутствие образца-адсорбата;

— раствор № 2 для измерения величины T_1 . В сухой мерной пробирке размещали образец наноматериала и добавляли тот же объем индикатора, что и при приготовлении раствора, после чего доводили до заданного объема дистиллированной водой и перемешивали. В этом опыте при фотометрировании учитывается изменение пропускания раствора индикатора за счет его адсорбции и изменения pH среды;

— раствор № 3 для измерения величины T_2 . В сухую мерную пробирку вносили образец наноматериала, добавляли 4 или 8 мл (в зависимости от заданного объема) дистиллированной воды и перемешивали. В данном опыте исключается процесс адсорбции индикатора, но учитывается влияние на пропускание индикатора процессов взаимодействия образца с растворителем — поправка на изменение водной среды (увеличение или понижение) при контакте с образцом.

Приготовленные три рабочих раствора фотометрировали, измеряя коэффициенты пропускания T_0 , T_1 и T_2 при длине волны, соответствующей параметрам данного индикатора относительно воды, и пересчитывая их в коэффициенты поглощения A по формуле

$$A = \lg\left(\frac{100}{T}\right). \quad (1)$$

На основании полученных данных проводили расчет содержания активных центров $Q(pK_a)$ по следующей формуле:

$$Q(pK_a) = \frac{c_{ind} \cdot V_{ind}}{D_0} \left(\left| \frac{A_1 - A_0}{s_1} \pm \frac{A_2 - A_0}{s_2} \right| \right), \quad (2)$$

где c_{ind} и V_{ind} — концентрация и объем индикаторов соответственно; s_1 и s_2 — площади поверхности наноматериалов, изготовленных в виде тонких пленок; знаки "+" и "-" отвечают соответственно разнонаправленному ($A_1 > A_0 > A_2$ или $A_1 < A_0 < A_2$) и однонаправленному ($A_1, A_2 > A_0$ или $A_1, A_2 < A_0$) изменению A_1 и A_2 относительно A_0 .

Поскольку точность оценки $Q(pK_a)$ в общем случае зависит от s_1 и s_2 , то требуется их достоверное определение как с учетом степени покрытия (β) пленкой поверхности подложки, так и исходя из удельной площади поверхности наноматериала. Учет степени покрытия является особенно важным для образцов наноматериалов после дополнительной активации поверхности, которая при высоких мощностях источника плазмы и длительном времени воздействия может приводить к ее деградации. Для оценки дан-

ной величины использовали изображения образцов наноматериалов в графическом формате, которые обрабатывали с использованием специализированного графического редактора типа *ImageJ*. На первом этапе обработки выделяли фрагменты изображения, соответствующие макроскопическому нарушению покрытия. В рамках второго этапа изображение переводили в двухцветный формат и использовали функцию контраста. На заключительном этапе обработки рассчитывали β как отношение суммы площадей фрагментов (s_{fr}) изображения, соответствующих макроскопическому нарушению покрытия, к общей площади пленки s_{str} :

$$\beta = \frac{\Sigma s_{fr}}{s_{str}}. \quad (3)$$

Исходя из изложенного выше, $Q(pKa)$ можно определить по следующей формуле:

$$Q(pKa) = \frac{c_{ind} \cdot V_{ind}}{D_0} \times \left(\left(\frac{|A_1 - A_0|}{(1 - \beta_1) \cdot \gamma_1 \cdot s_{str}} \pm \frac{|A_2 - A_0|}{(1 - \beta_2) \cdot \gamma_2 \cdot s_{str}} \right) \right), \quad (4)$$

где γ_1 и γ_2 — коэффициенты корреляции между микро- и макроструктурой, отражающие увеличение площади поверхности наноматериалов в результате образования нескольких уровней пространственной иерархии (в первом приближении определяются по данным атомно-силовой микроскопии).

Результатом расчета по формуле (4) является распределение концентрации адсорбционных центров в координатах $Q/Q_{max} = f(pKa)$, где Q_{max} — максимальное значение концентрации адсорбционных центров при фиксированном значении pKa . На рис. 3 представлена типичная зависимость $Q/Q_{max} = f(pKa)$ для наноматериалов с иерархической структурой на основе диоксида олова в матрице диоксида кремния до процесса дополнительной активации.

На рис. 4 представлена типичная зависимость $Q/Q_{max} = f(pKa)$ для наноматериалов с иерархической структурой на основе диоксида олова в матрице диоксида кремния после процесса дополнительной активации в плазме аргона.

Анализ представленных на рис. 3 и 4 зависимостей показывает, что преобладающими центрами на поверхности наноматериалов на основе диоксида олова в матрице диоксида кремния до процесса дополнительной активации являются

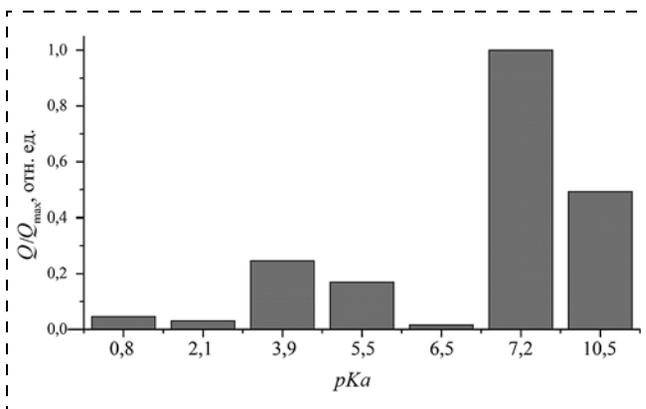


Рис. 3. Распределение центров адсорбции на поверхности наноматериалов с иерархической структурой на основе диоксида олова в матрице диоксида кремния до процесса дополнительной активации

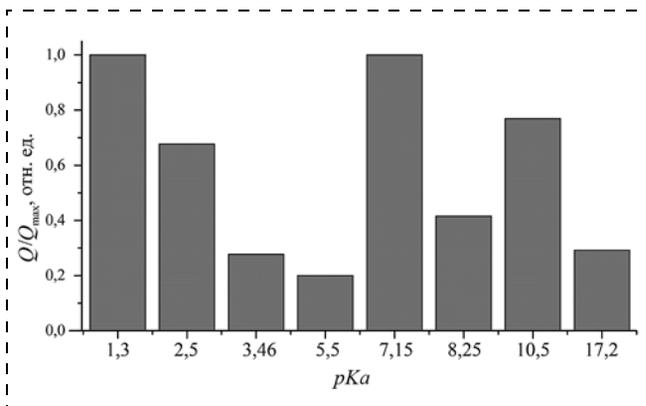


Рис. 4. Распределение центров адсорбции на поверхности наноматериалов с иерархической структурой на основе диоксида олова в матрице диоксида кремния после процесса дополнительной активации в плазме аргона

центры нейтрального характера ($pKa = 7,2$) и основные центры типа Бренстеда ($pKa > 7,2$). Данные центры представлены поверхностными гидроксильными группами, имеющими строение Sn—ОН в различных конфигурациях. Кислотные центры типа Бренстеда ($pKa < 7,2$) представляют собой протоны, связанные с поверхностными атомами кислорода, находящимися в различных конфигурациях. В процессе дополнительной активации наноматериала плазмой аргона наблюдается значительный рост кислотных центров типа Бренстеда по отношению к основным центрам Бренстеда и кислотным центрам типа Льюиса ($pKa = 17,2$). Данное явление, по всей видимости, отвечает повышению акцепторных свойств энергетических уровней атомов кислорода, выходящих на поверхность, при воздействии плазмы аргона. Конкретный механизм, отвечающий наблюдаемому явлению, не до конца ясен, однако может быть связан с пре-

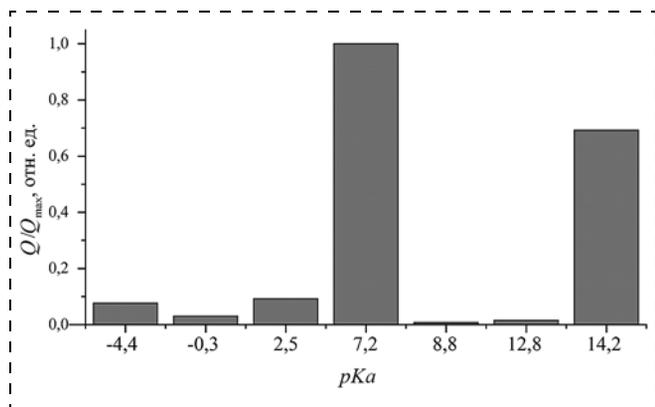


Рис. 5. Распределение центров адсорбции на поверхности наноматериалов с иерархической структурой на основе оксида цинка до процесса дополнительной активации

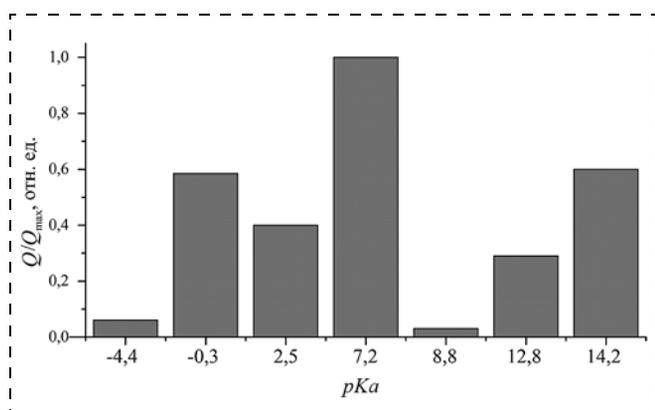


Рис. 6. Распределение центров адсорбции на поверхности наноматериалов с иерархической структурой на основе оксида цинка после процесса дополнительной активации в плазме аргона

обладанием гетеролитического (ионного) механизма диссоциативной адсорбции молекул воды.

Аналогичные по характеру зависимости распределения центров адсорбции до и после дополнительной активации поверхности были получены для наноматериалов с иерархической структурой на основе оксида цинка (рис. 5 и 6).

Оценка фотокаталитических свойств

Также проводили оценку фотокаталитических свойств наноматериалов с иерархической структурой на основе ZnO, SnO₂ до и после процесса активации. Для приготовления раствора модельного загрязнителя 4,2 мг метилового красного растворяли в 1 л дистиллированной воды. Начальная концентрация загрязнителя составляла порядка 10 ppm. При проведении исследований в два измерительных сосуда наливали по 100 мл раствора индикатора. В один из сосудов помещали образцы наноматериалов, синтезиро-

ванные в виде тонких пленок на стеклянной подложке. Сосуды с образцом и без него устанавливали в темный металлический шкаф, где облучали ультрафиолетовым светом с основной длиной волны $\lambda = 420$ нм в течение 4 ч. В ходе проведения фотокатализа каждые 30 мин из обоих сосудов забирали пробы объемом 5 мл, коэффициент оптического пропускания которых оценивали с помощью спектрофотометра СФ-56 на длине волны, соответствующей максимальному поглощению красителя (430 нм). После проведения измерений пробы возвращали обратно в раствор. Исходя из значений коэффициента пропускания и начальной концентрации загрязнителя C_0 , по известному закону Бугера—Ламберта—Бера находили концентрацию загрязнителя C в заданный момент времени. При этом предполагали, что коэффициент поглощения раствора и длина оптического пути света в кварцевой кювете являются постоянными величинами.

В целом процессы фотодеградации метилового красного близки к реакции псевдопервого порядка, а кинетика фотокаталитического процесса для иерархических наноматериалов на основе полупроводниковых оксидов приблизительно может быть описана уравнением следующего вида [9, 10]:

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -kt, \quad (5)$$

где C_0 — начальная концентрация красителя; C — концентрация красителя в заданный момент t ; k — константа скорости реакции фотодеградации.

В табл. 2 представлены константы скорости фотокаталитического разложения метилового красного на иерархических наноматериалах на основе ZnO и SnO₂ в зависимости от мощности источника плазмы в среде аргона (время воздействия 150 с).

Анализ представленных в табл. 2 данных показывает, что при относительной низкой энергии частицы плазмы (мощности источника 200...600 Вт) дополнительная активация способст-

Таблица 2
Значения k (мин⁻¹) в зависимости от мощности источника

| Образец | Мощность источника, Вт | | | | |
|------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 0* | 200 | 400 | 600 | 1100 |
| SnO ₂ | $1,4 \cdot 10^{-4}$ | $1,4 \cdot 10^{-4}$ | $1,6 \cdot 10^{-4}$ | $1,8 \cdot 10^{-4}$ | $1,1 \cdot 10^{-4}$ |
| ZnO | $2,8 \cdot 10^{-3}$ | $3,2 \cdot 10^{-3}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$ | $4,3 \cdot 10^{-3}$ | $2,3 \cdot 10^{-3}$ |

Примечание. * Значение k до дополнительной активации.

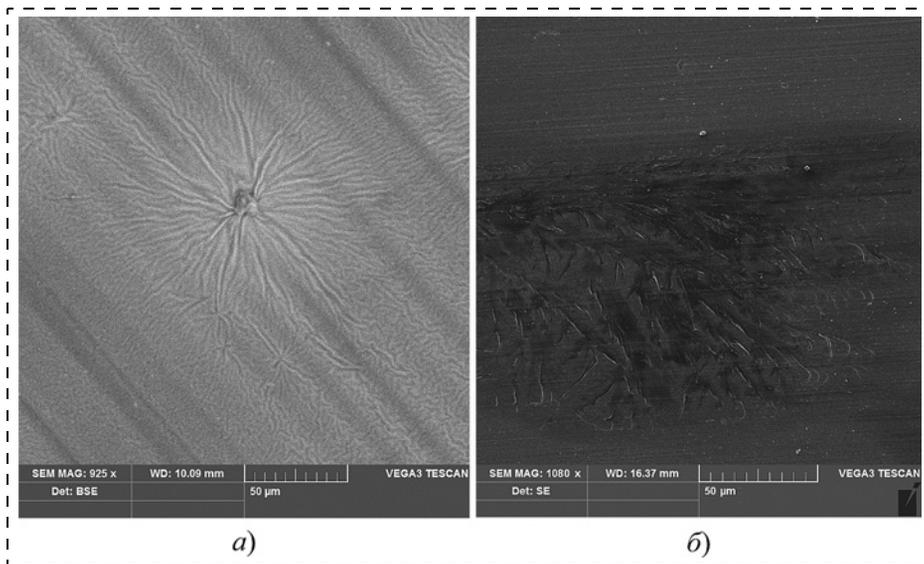


Рис. 7. РЭМ-изображения поверхности иерархических наноматериалов на основе ZnO до и после дополнительной активации:

a — до процесса дополнительной активации; *b* — после процесса дополнительной активации в плазме в среде аргона при высоких мощностях источника и/или длительности воздействия

ует росту фотокаталитической активности иерархических наноматериалов на основе ZnO и SnO₂. При этом значения k для диоксида олова на порядок меньше значений констант скорости для оксида цинка, что отвечает низкой фотокаталитической активности данного материала независимо от дополнительной активации. При больших мощностях источника плазмы или более длительном процессе активации наблюдается значительное ухудшение фотокаталитического разложения как для ZnO, так и для SnO₂, причем значения $k = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$ и $k = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ мин}^{-1}$ становятся даже меньше, чем у образцов без воздействия плазмой в среде аргона ($k = 2,8 \times 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$ и $k = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ мин}^{-1}$ соответственно). Конкретные процессы, протекающие при взаимодействии частиц плазмы с поверхностью наноматериалов, не до конца ясны, при этом установлено, что они приводят к росту удельной площади поверхности, увеличению числа кислотных центров типа Бренстеда и изменению дефектности образцов [11]. Наблюдаемое ухудшение фотокаталитических свойств SnO₂ и ZnO при высоких мощностях источника индуктивно-связанной плазмы (около 1100 Вт) вызвано деградацией структуры наноматериалов, что подтверждается данными растровой электронной микроскопии (рис. 7). При измерениях в качестве подложки для иерархических наноматериалов, изготавливаемых в виде тонких пленок, использовали алюминиевую фольгу.

Заключение

На основании всего изложенного выше можно сделать вывод о перспективности дополнительной активации плазмой аргона поверхности образцов наноматериалов с иерархической структурой на основе ZnO, SnO₂, полученных в рамках золь-гель-технологии. Установлены корреляции между адсорбционными свойствами (рост содержания кислотных центров типа Бренстеда) и фотокаталитической активностью (рост значений константы скорости фотокаталитического разложения) при дополнительной активации поверхности иерархических наноматериалов на основе полупроводниковых оксидов плазмой в среде аргона.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов 19-08-00924, 20-38-90155 и гранта Президента МК-3541.2021.1.2 и МД-172.2021.4.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-08-00924, project number 20-38-90155, and under the grant of the President of the Russian Federation for the state support of young Russian scientists (project number МК-3541.2021.1.2, project number МД-172.2021.4).

Список литературы

1. Thirukumar P., Atchudan R., Parveen A. S. et al. Fabrication of ZnO nanoparticles adorned nitrogen-doped carbon balls and their application in photodegradation of organic dyes // Scientific Reports. 2019. Vol. 9 (1). P. 1–13.
2. Zhang Z., Ma Y., Wu X. et al. Facile one-step synthesis of TiO₂/Ag/SnO₂ ternary heterostructures with enhanced visible light photocatalytic activity // Scientific reports. 2018. Vol. 8 (1). P. 1–11.
3. Крупкин Е. И., Аверин И. А., Пронин И. А., Карманов А. А., Якушова Н. Д. Получение наноструктурированных пленок оксида цинка и исследование их фотокаталитических свойств // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 1. С. 23–34.
4. Pan L., Ai M., Huang C. et al. Manipulating spin polarization of titanium dioxide for efficient photocatalysis // Nature Communications. 2020. Vol. 11 (1). P. 1–9.
5. Игошина С. Е., Аверин И. А., Карманов А. А. Моделирование газочувствительности пористых пленок на основе полупроводниковых оксидов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 48. С. 115–119.
6. Mhlongo G. H., Motaung D. E., Cummings F. R. et al. A highly responsive NH₃ sensor based on Pd-loaded ZnO nan-

oparticles prepared via a chemical precipitation approach // *Scientific reports*. 2019. Vol. 9 (1). P. 1–18.

7. **Мошников В. А., Максимов А. И., Александрова О. А., Пронин И. А., Карманов А. А., Теруков Е. И., Якушова Н. Д., Аверин И. А., Бобков А. А., Пермяков Н. В.** Нанолитографическая самосборка коллоидных наночастиц // *Письма в ЖТФ*. 2016. Т. 42, № 18. С. 81–87.

8. **Пронин И. А., Якушова Н. Д., Димитров Д. Ц., Красева Л. К., Папазова К. И., Карманов А. А., Аверин И. А., Георгиева А. Ц., Теруков Е. И., Мошников В. А.** Новый тип газовых сенсоров на основе термовольтаического эффекта в оксиде цинка, неоднородно легированном примесями переменной валентности // *Письма в ЖТФ*. 2017. Т. 43, № 18. С. 11–16.

9. **Le Pivert M., Poupart R., Sapochichi-Gnambodoe M.** et al. Direct growth of ZnO nanowires on civil engineering materials: smart materials for supported photodegradation // *Microsystems & Nanoengineering*. 2019. Vol. 5 (1). P. 1–7.

10. **Пронин И. А., Каева Н. В., Божинова А. С., Аверин И. А., Папазова К. И., Димитров Д. Ц., Мошников В. А.** Фотокаталитическое окисление фармацевтических препаратов на тонких наноструктурированных пленках оксида цинка // *Кинетика и катализ*. 2014. Т. 55, № 2. С. 176–180.

11. **Dao H. T., Makino H.** Enhancement in optoelectrical properties of polycrystalline ZnO thin films by Ar plasma // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2019. Vol. 96. P. 46–52.

A. V. Meshcheriakov, Master's Degree Student, **A. P. Sigaev**, Postgraduate Student, **I. A. Averin**, D. Sc., Professor, Head of Chair, **A. A. Karmanov**, Ph. D., Associate Professor, **I. A. Pronin**, Dr. Sc., Professor, **N. D. Yakushova**, Senior Lecturer, Penza State University, Penza, Russian Federation

Corresponding author:

Sigaev Aleksandr P. Postgraduate Student, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: alexsigaev-94@yandex.ru

Modification of the Adsorption Properties of Nanomaterials Based on Zinc Oxide and Tin Dioxide after Additional Activation in Argon Plasma

Received on March 17, 2021

Accepted on April 20, 2021

The modification of the adsorption properties of nanomaterials based on ZnO and SnO₂, synthesized by the sol-gel method, after additional activation of their surface by argon plasma has been studied. Correlation between the adsorption properties and photocatalytic activity has been established. The scanning electron microscopy has confirmed the degradation of structure of nanomaterials with high-power plasma source and/or prolonged activation, and as a consequence, reduction of their photocatalytic properties

Keywords: *nanomaterials, sol-gel technology, zinc oxide, tin dioxide, activation in argon plasma*

For citation:

Meshcheriakov A. V., Sigaev A. P., Averin I. A., Karmanov A. A., Pronin I. A., Yakushova N. D. Modification of the Adsorption Properties of Nanomaterials Based on Zinc Oxide and Tin Dioxide after Additional Activation in Argon Plasma, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 186–192.

doi: 10.17587/nmst.23.186-192

References

1. **Thirukumar P., Atchudan R., Parveen A. S.** et al. Fabrication of ZnO nanoparticles adorned nitrogen-doped carbon balls and their application in photodegradation of organic dyes, *Scientific Reports*, 2019, vol. 9 (1), pp. 1–13.

2. **Zhang Z., Ma Y., Bu X.** et al. Facile one-step synthesis of TiO₂/Ag/SnO₂ ternary heterostructures with enhanced visible light photocatalytic activity, *Scientific reports*, 2018, vol. 8 (1), pp. 1–11.

3. **Krupkin E. I., Averin I. A., Pronin I. A., Karmanov A. A., Yakushova N. D.** *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 23–34 (in Russian).

4. **Pan L., Ai M., Huang C.** et al. Manipulating spin polarization of titanium dioxide for efficient photocatalysis, *Nature Communications*, 2020, vol. 11 (1), pp. 1–9.

5. **Igoshina S. E., Averin I. A., Karmanov A. A.** *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 2014, no. 48, pp. 115–119 (in Russian).

6. **Mhlongo G. H., Motaung D. E., Cummings F. R.** et al. A highly responsive NH₃ sensor based on Pd-loaded ZnO nano-

particles prepared via a chemical precipitation approach, *Scientific reports*, 2019, vol. 9 (1), pp. 1–18.

7. **Moshnikov V. A., Maksimov A. I., Aleksandrova O. A., Pronin I. A., Karmanov A. A., Terukov E. I., Yakushova N. D., Averin I. A., Bobkov A. A., Permjakov N. V.** *Pis'ma v ZhTF*, 2016, vol. 42, no. 18, pp. 81–87 (in Russian).

8. **Pronin I. A., Yakushova N. D., Dimitrov D. C., Krasteva L. K., Papazova K. I., Karmanov A. A., Averin I. A., Georgieva A. C., Terukov E. I., Moshnikov V. A.** *Pis'ma v ZhTF*, 2017, vol. 43, no. 18, pp. 11–16 (in Russian).

9. **Le Pivert M., Poupart R., Sapochichi-Gnambodoe M.**, et al. Direct growth of ZnO nanowires on civil engineering materials: smart materials for supported photodegradation, *Microsystems & nanoengineering*, 2019, vol. 5 (1), pp. 1–7.

10. **Pronin I. A., Kaneva N. V., Bozhinova A. S., Averin I. A., Papazova K. I., Dimitrov D. C., Moshnikov V. A.** *Kinetika i kataliz*, 2014, vol. 55, no. 2, pp. 176–180 (in Russian).

11. **Dao H. T., Makino H.** Enhancement in optoelectrical properties of polycrystalline ZnO thin films by Ar plasma, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2019, vol. 96, pp. 46–52.

Н. К. Толочко, д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: n.tolochko@hotmail.com,
Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ МИКРОСИСТЕМ

Поступила в редакцию 06.04.2021

Рассмотрены разновидности аддитивных технологий, применяемых для изготовления неэлектронных компонентов микросистем, а также разновидности неэлектронных компонентов, изготавливаемых с помощью этих технологий. Обсуждены особенности реализации аддитивных технологий при изготовлении неэлектронных компонентов микросистем.

Ключевые слова: аддитивные технологии, микрокомпоненты, микромеханика, микрооптика, микрофлюидика

Введение

Устройства микросистемной техники состоят из разнообразных микрокомпонентов (МК), которые делят на электронные и неэлектронные [1]. К неэлектронным МК относятся механические, оптические и механико-флюидные. Для их изготовления используют традиционные микро-технологии: локальное осаждение и травление, механическая, лазерная и электроэрозионная микрообработка, микролитье под давлением и др. [2]. Как правило, они непригодны для изготовления трехмерных (3D) МК сложной конфигурации с высоким характеристическим отношением, в их основе лежат дорогостоящие многостадийные процессы, для реализации которых требуются специализированные помещения и оборудование, специально подготовленный персонал [2–4].

Для изготовления МК применяют аддитивные технологии (AM-технологии — от англ. *Additive Manufacturing*) (или технологии 3D-печати), которые лишены недостатков традиционных микротехнологий. В данной работе рассмотрены AM-технологии, позволяющие создавать неэлектронные МК с характерными размерами, охватывающими весь микрометровый диапазон, а также частично — субмикрометровый.

Разновидности аддитивных технологий

Известны разнообразные AM-технологии, различающиеся способами реализации процессов построения изделий, функциональными воз-

можностями оборудования (3D-принтеров) и свойствами исходных материалов, используемых для построения. Ниже приведены те из них, которые применяют для изготовления неэлектронных МК (в скобках указаны иные названия технологий).

Stereolithography Apparatus, SLA / SL / — последовательно наносимые слои жидкого фотополимера (ФП) селективно отверждаются под действием УФ лазера; *Microstereolithography, μ SL* — микромасштабный вариант *SLA* [2, 5–8].

Digital Light Processing, DLP / Projection Stereolithography, PSL / — аналог *SLA*: ФП отверждается облучением УФ проектора; *Projection Microstereolithography, P μ SL* — микромасштабный вариант *PSL* [2, 4, 9–16].

Mask Projection Stereolithography, MPL / LCD-SLA / — аналог *SLA*: ФП отверждается УФ потоком, проходящим через фотомаску; *Mask Projection Microstereolithography (MP μ SL)* — микромасштабный вариант *MPSL* [2, 17–19].

Direct Laser Writing, DLW / Two-photon Polymerization, 2PP / TPP / — аналог *SLA*: ФП отверждается в результате многофотонной (двухфотонной) полимеризации под действием фемтосекундного лазера [2, 4, 20–26].

Frontal Polymerization, FP — послойное нанесение жидких полимерных слоев и их селективное отверждение путем фронтальной (самораспространяющейся экзотермической) полимеризации [2]. *Frontal Photopolymerization, FPP* — вариант *FP*: ФП отверждается путем полимеризации, инициируемой облучением, формируемым УФ проектором (аналог *DLP*) [27] или фо-

томаской (аналог *MPSL*) [28]. *Thermal Frontal Polymerization, TFP* — вариант *FP*: "чернила" на основе реактопласта выдавливают через экструдер и подают в место построения, где отверждаются путем полимеризации, инициируемой внешним тепловым источником, например нагретой платформой (аналог *IJP*) [2, 29].

Inkjet Printing, IJP / Multi-Jet Modeling, MJM / Poly-Jet / — "чернила" в виде жидкого ФП или расплавленного термопласта, либо в виде суспензии впрыскивают через сопло печатающей головки в место построения, где ФП и термопласт отверждаются при УФ облучении или охлаждении, а твердые частицы суспензии агломерируются [2, 3, 30—33].

Aerosol Jet Printing, AJP — аналог *IJP*: "чернила" в виде суспензии переводятся в аэрозоль, который распыляют через сопло плотной струей, сфокусированной обволакивающим газом, в место построения, где твердые частицы аэрозоля агломерируются [34].

Direct Ink Writing, DIW — "чернила" в виде вязкотекучих материалов выдавливают из экструдера в место построения, где отверждают под действием разных факторов, например, УФ облучением [4, 35—38].

Fused Deposition Modeling, FDM / Fused Filament Fabrication, FFF — волокно из термопласта протягивают через экструдер, где оно расплавляется, а затем подается в место построения, где отверждается при охлаждении [2, 13, 39, 40].

Selective Laser Sintering / Melting, SLS / SLM — последовательно наносимые слои порошка селективно спекают или плавят лазером. *Direct Metal Laser Sintering / Melting, DMLS / DMLM* — разновидность *SLS/SLM*: спекают или плавят металлические порошки. *Micro Selective Laser Sintering/Melting, μ SLS/ μ SLM* — микромасштабные варианты *SLS* и *SLM* [2, 41, 42].

Direct Laser Metal Deposition, DLMD / Laser engineered net shaping, LENS — металлический порошок селективно подается непосредственно в место построения, где подвергается лазерной послойной наплавке [43].

Electron Beam Melting, EBM — аналог *SLM*: слои металлического порошка плавят не лазером, а электронным лучом [2, 44—46].

Binder Jetting, BJ — на последовательно наносимые слои порошка селективно подается каплями жидкий связующий агент, который связывает (склеивает) частицы порошка между собой и с предыдущими слоями [47].

Sheet Lamination, SHL — исходный листовый материал подвергают контурному раскрою, листовые выкройки пакетируют и соединяют друг с другом [2]; *Laminated Object Manufacturing, LOM* — вариант *SHL*: выкройки из бумаги, пластика и т. п. склеивают [48]; *Ultrasonic Additive Manufacturing, UAM* — вариант *SHL*: выкройки из металлической фольги сваривают ультразвуком [49].

Laser-Induced Forward Transfer, LIFT — лазерная абляция тонкой пленки, нанесенной на прозрачную пластину, и перенос образовавшихся капель расплава в место построения, где они затвердевают при охлаждении [2, 50, 51].

Electrochemical Deposition, ED — селективное электрохимическое осаждение металла на поверхность путем перемещения над ней пипетки с электролитом, так что между поверхностью и пипеткой образуется столбик жидкости [2, 52].

Laser Chemical Vapor Deposition, LCVD — селективное химическое осаждение из паровой фазы (*CVD*) под действием лазерного луча (*L*) [53].

Focused Ion Beam-induced Chemical Vapor Deposition, FIB-CVD / Focused Ion Beam-induced Deposition, FIBID / — селективное химическое осаждение из паровой фазы под действием сфокусированного ионного луча (*FIB*) [54].

Focused Electron Beam-induced Chemical Vapor Deposition, FEB-CVD / Focused Electron Beam-induced Deposition, FIBID / — аналог *FIB-RTIL*: осаждение под действием сфокусированного электронного луча (*FEB*) [55].

Focused Ion Beam-induced Room-Temperature Ionic Liquid (RTIL) polymerization, FIB-RTIL — послойная селективная полимеризация ионных жидкостей на основе легкоплавких органических солей (*RTIL*) под действием сфокусированного ионного пучка [56].

Focused Electron Beam-induced Room-Temperature Ionic Liquid (RTIL) polymerization, FEB-RTIL — аналог *FIB-RTIL*: полимеризация под действием сфокусированного электронного луча [57].

Разновидности микрокомпонентов

В таблице приведены типичные примеры применения *AM*-технологий для изготовления МК, а также демонстрационных образцов модельных микроструктур (МК) с указанием их характерных размеров (*D* — диаметр, *W* — ширина, *T* — толщина). На рис. 1—3 показаны МК, полученные с помощью *AM*-технологий.

Обычно по *AM*-технологиям создают готовые МК. Иногда печатают не сами МК, а их заготов-

| МК и МС/АМ-технология, ссылки | Характерные размеры, мкм |
|--|--|
| Микромеханика | |
| <p>Микрошестерни/SLA [6] Микротрубки/SLA [6] Цилиндрические микроспирали/DLP [9] Крыльчатка микроventилятора/DLP [10] Микрозажим/DLP [11] Столбчато-решетчатые МС/DLP [12] Микрошестерни/MPSL [17] Крыльчатка микроventилятора/MPSL [18] Труба с микрорезьбой/MPSL [18] Каркасные МС/DLW [20] Решетчатые МС/DLW [21] Волокнистые МС/DLW [22] Цилиндрические микроспирали/FP [29] Решетчатые МС-скаффолды/AJP [34] Столбчатые МС/AJP [34] Рельефные МС/AJP [34] Электротермомикроактуатор/DIW [4] Погружной микроактуатор/DIW [36] Решетчатые МС/DIW [37] Решетчатые МС-скаффолды/FDM [39] Микрошестерни/SLS [41] Сферические оболочки/SLS [41] Концентрические кольца/SLS [41] Цилиндрические микроспирали/SLS [41] Сотовые МС/SLM [42] Пористые имплантные МС/EBM [44] Решетчатые МС/BJ [45] Тестовые стержни/DMLD [46] Сотовые МС/DMLD [47] Рельефные МС/LIFT [50] Микрошестерни/LIFT [51] Проволочные микрошетки/ED [52] Цилиндрические микроспирали/LCVD [53] Цилиндрические микроспирали/FIB-CVD [54] Четырехпальцевый микросхват/FIB-CVD [54] Сетчатый микрзахват/FIB-CVD [54] Решетчатые МС/FEB-CVD [55] Каркасные и решетчатые МС/FIB-RTIL [56] Крестовидные МС/FEB-RTIL [7]</p> | <p><i>D/T</i> шестерни — 100/15, <i>W</i> зубьев — 12 Внутренний <i>D</i> трубки — 50 <i>D</i> спирали — 100, <i>D</i> нити спирали — 25 <i>D/W/T</i> лопасти — 500/220/30 <i>D</i> зажимного отверстия — 240 <i>D</i> столбиков/ребер — 200/30 <i>W</i> зубьев — 60 <i>T</i> лопастей — 50 Шаг резьбы — 125 <i>T</i> ребер каркаса — 0,5 <i>T</i> ребер решетки — 0,2 <i>D</i> волокон — 0,5 <i>D</i> нити спирали — 500 <i>T</i> ребер решетки — 35 <i>D</i> столбиков — 80 <i>W</i> полосчатых выступов — 5 <i>W</i> изгибного рычага — 5...10 <i>W/T</i> изгибного рычага — 200/45 <i>T</i> ребер решетки — 30 <i>T</i> ребер решетки — 100 <i>W</i> зубьев — 600 <i>T</i> оболочек — 100 <i>T</i> стенок колец — 40 <i>D</i> нити спирали — 350 <i>T</i> стенок сот — 100 <i>D</i> пор — 360, <i>T</i> прослоек — 120 <i>T</i> ребер решетки — 300 <i>D</i> стержня — 450 <i>T</i> стенок сот — 700 <i>D</i> каплевидных выступов — 0,22 <i>D</i> шестерни — 400, <i>W</i> зубьев — 20 <i>D</i> проволок — 0,2 <i>D</i> спирали/нити спирали — 100/25 <i>D</i> спирали/нити спирали — 0,6/0,08 <i>T</i> пальца — 5/0,5 <i>D</i> каркаса — 7, <i>D</i> ячеек — 1 <i>T</i> ребер решетки — 0,05 <i>T</i> ребер — 0,25 <i>T</i> стержней — 0,3</p> |
| Микрооптика | |
| <p>Оптические микрорезонаторы/DLP [13] Микролинзы сферические/DLW [23] Микролинзы Френеля/DLW [23] Микролинзы сферические/DLW [24] Микролинзы разных форм/DLW [25] Микролинзы сферические/IJP [30] Волоконные микролинзы/IJP [31] Микролинзы цилиндрические/DIW [38] Интерференционные МС/FIB-CVD [54]</p> | <p><i>D</i> диска резонатора — 320 <i>D/T</i> линзы — 15/8 <i>D</i> зон линзы — 10, 14 и 17, <i>T</i> линзы — 2 <i>D/T</i> линзы — 20/2,5 <i>D</i> линзы — 200 <i>D</i> линзы — 50 <i>D</i> линзы — 70 <i>D</i> линзы — 10 <i>T</i> слоев — 0,2</p> |
| Микрофлюидика | |
| <p>Микроканалы/SLA[5] Мембранный микроклапан/DLP [14] Микроканалы/DLP [14] Микроканалы/DLP [15] Микроканалы/DLP [16] Микроканалы/MPSL [19] Микроканалы/DLW [26] Микроканалы/IJP [15] Обратный микроклапан/IJP [3] Канальные микромиксеры/IJP [32] Микроканалы/DIW [35] Микроканалы/FDM [15] Микроканалы/LOM [50]</p> | <p><i>D</i> канала — 50 <i>T</i> мембраны — 50 Сечение канала — 250 × 350 <i>D</i> канала — 500 Сечение канала — 18 × 20 Сечение канала — 600 × 600 <i>D</i> канала — 5 <i>D</i> канала — 500 <i>T</i> заслонки — 200 <i>D</i> канала — 200 Сечение канала — 32 × 30 <i>D</i> канала — 500 Сечение канала — 800 × 400</p> |

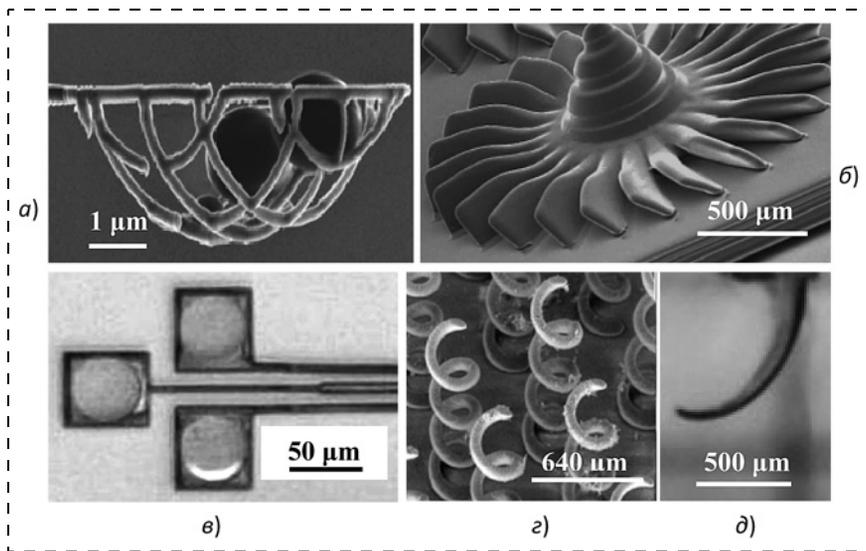


Рис. 1. Механические микрокомпоненты:

a — микросетка-захват (FIB-CVD) [54]; *б* — крыльчатка микроventильатора (PμSL) [10]; *в* — электротермический микроактуатор (DIW) [4]; *г* — микроспирали (PμSL) [9]; *д* — изгибной рычаг погружного микроактуатора (DIW) [34]

ки или формообразующие инструменты, используемые для получения МК. Так, по FDM-технологии создавали заготовки оптоволокон из термопластов, состоявших из разных по составу оболочек диаметром 18,6 мм и сердцевины диаметром 8 мм, после чего из них вытягивали оптоволокна с наружным диаметром 200 мкм и диаметром сердцевины 60 мкм (рис. 2, д) [40]. По IJP-технологии создавали литейные микроформы из фотополимеров, с помощью которых получали микрофлюидные устройства из термопластов, в частности мембранные микроклапаны

исходных материалов, служащих для построения в основном фотополимеров (SLA, DLP, MPLS, DLW, FP, IJP) и термопластов (IJP, FDM, SLS, LOM), реже — металлов (DMLS, DMLM, DLMD, EBM, SHL, ED), пример тому — металлические микрозеркала (DMLS и EBM [59]). Ряду AM-технологий (LCVD, FIB-CVD, FEB-CVD, FIB-RTIL, FEB-RTIL) присущи превращения исходных материалов в процессе печати. Так, при создании многослойных интерференционных MC (FIB-CVD) осаждаемый материал — алмазоподобный аморфный углерод, в то время

(толщина мембраны 350 мкм) с микроканалами (диаметр 550 мкм) (рис. 3, д, е) [7, 33].

По AM-технологиям в основном создают отдельные элементы микроустройств, например, микролинзы [25] или проточные микроканалы [14, 15, 26]. Также печатают целиком микроустройства: микромиксеры [32], микроактуаторы [4], оптические дисковые МШГ-микрорезонаторы [13], микрофлюидные схемы на основе микрофлюидных конденсаторов, диодов, транзисторов [57].

Особенности реализации аддитивных технологий

МК, созданные по большинству AM-технологий, состоят из

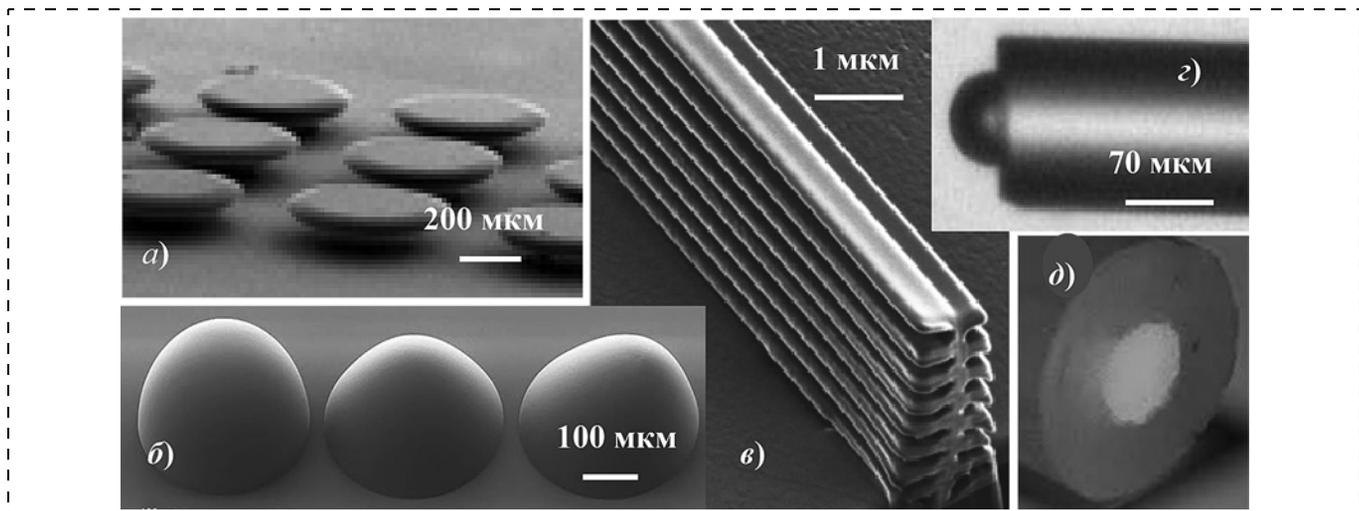


Рис. 2. Оптические микрокомпоненты:

a — оптические дисковые микрорезонаторы (PμSL) [13]; *б* — микролинзы (слева направо): сферическая, асферическая и асимметричная (DLW) [25]; *в* — многослойная интерференционная микроструктура типа крыльев бабочки Морфо (FIB-CVD) [54]; *г* — микролинза, сформированная на торце оптоволокна (IJP) [31]; *д* — оптоволоконная заготовка с разнородными по составу оболочкой и сердцевиной (FDM) [40]

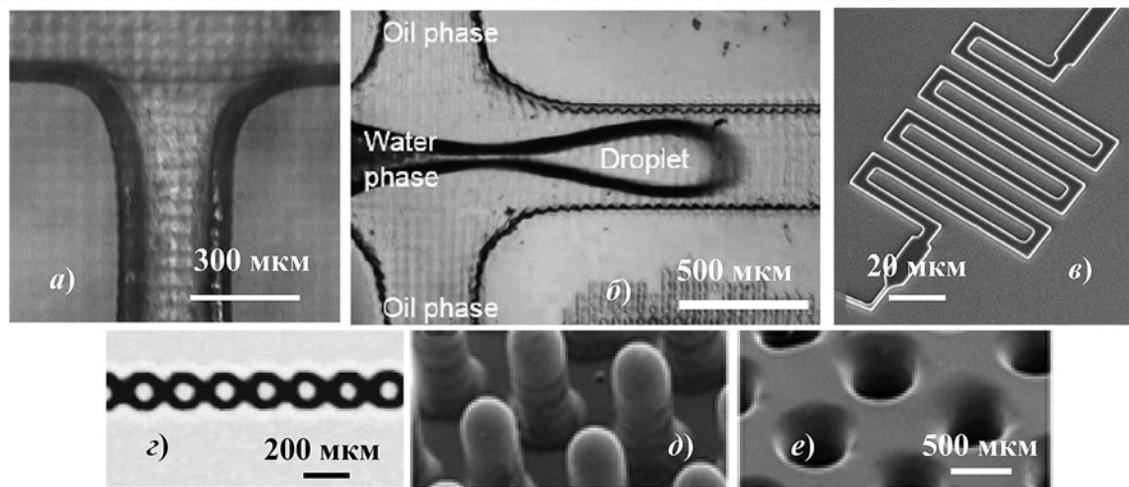


Рис. 3. Механико-флюидные микрокомпоненты:

a — прямой микроканал (PμSL) [14]; *b* — генератор капель (μSL) [7]; *c* — меандрированный микроканал (*DLW*) [26]; *d* — микромиксер типа кольцеобразного канала (*JJP*) [32]; *e* — 3D-напечатанная литейная форма и полученная с ее помощью система микроканалов (*JJP*) [33]

как исходный материал — прекурсор фенантрена ($C_{14}H_{10}$) [54]. Подобные превращения материалов также происходят при пост-обработке. Так, из МК, напечатанных из полимерных композитов, наполненных керамическими порошками, после термообработки образуются керамические МК [6]. Перспективны *AM*-технологии, позволяющие печатать МК сразу из нескольких материалов, что улучшает свойства МК [58], а также встраивать готовые дискретные элементы в печатаемые микроустройства, что повышает эффективность *AM*-систем [58].

Заключение

Имеется много *AM*-технологий, позволяющих создавать неэлектронные МК. Эти технологии постоянно совершенствуются, прежде всего, в направлении повышения их разрешающей способности. Многие из них позволяют получать МК с характерными размерами от десятков до единиц микрометров. Особый практический интерес представляют *AM*-технологии, обеспечивающие достижение субмикрометровых характерных размеров печатаемых МК (*DLW*, *ED*, *FIB-CVD*, *FEB-CVD*, *FIB-RTIL*, *FEB-RTIL*). Ожидается, что в ближайшем будущем все эти технологии получат широкое производственное применение.

Список литературы

1. Вернер В. Д., Иванов А. А., Коломенская Н. Г. и др. Изделия микросистемной техники — основные понятия и

термины // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 2—5.

2. Kumar S., Bhushan P., Pandey M., Bhattacharya S. Additive manufacturing as an emerging technology for fabrication of microelectromechanical systems (MEMS) // J. Micromanufacturing. 2019. Vol. 2, Is. 2. P. 1—23.

3. Walczak R. Inkjet 3D printing — towards new micromachining tool for MEMS fabrication // Bull. Pol. Ac.: Tech. 2018. Vol. 66, N. 2. P. 179—186.

4. Ertugrul I., Akkus N., Yuce H. Fabrication of MEMS-based electrothermal microactuators with additive manufacturing technologies // Mater. & Technol. 2019. Vol. 53, N. 5. P. 665—670.

5. Stampfl J., Baudis S., Heller C. et al. Photopolymers with tunable mechanical properties processed by laser-based high-resolution stereolithography // J. Micromech. Microeng. 2008. Vol. 18, N. 12. 9 p.

6. Zhang X., Jiang X., Sun C. Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures // Sensors Actuators A Phys. 1999. Vol. 77. P. 149—156.

7. Mohamed M. G. A. Rapid and Inexpensive Fabrication of Multi-Depth Micro-uidic Device using High-Resolution LCD Stereolithographic 3D Printing // J. Manuf. Mater. Process. 2019. Vol. 3, N. 26. 11 p.

8. Zhakeyev A., Wang P., Li Z. et al. Additive Manufacturing: Unlocking the Evolution of Energy Materials // Advanced Science. 2017. Vol. 4, N. 10. 44 p.

9. Sun C., Fang N., Wu D. M., Zhang X. Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask // Sensors Actuators A: Phys. 2005. Vol. 212, Is. 1. P. 113—120.

10. Behroodi E., Lati H., Naja F. A compact LeD-based projection microstereolithography for producing 3D microstructures // Scientific Reports. 2019. Vol. 9, N. 1. 14 p.

11. Zheng X., Deotte J., Alonso M. P. et al. Design and optimization of a light-emitting diode projection micro-stereolithography three-dimensional manufacturing system // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. 8 p.

12. Kim S., Handler J. J., Cho Y. T. et al. Scalable additive manufacturing via integral image formation // 2019. <https://www.researchsquare.com/article/rs-85511/v1>.

13. Wu J., Guo X., Zhang A. P., Tam H.-Y. Rapid 3D μ-printing of polymer optical whispering-gallery mode resonators // Optics Express. 2015. Vol. 23, Is. 23. P. 29708—29714.

14. Rogers C. I., Qaderi K., Woolley A. T., Nordin G. P. 3D printed microfluidic devices with integrated valves // Biomicrofluidics. 2015. Vol. 9. P. 016501-1—016501-9.

15. **Majors R. E.** Highlights of HPLC 2017 Jeju // LCGC North America. 2018. Vol. 36, Is. 3. P. 94–99.
16. **Gong H.** Custom 3D printer and resin for 18 μm \times 20 μm microfluidic flow channels // *Lab Chip*. 2017. Vol. 17, Is. 17. P. 2899–2909.
17. **Suryatal B. K., Deshmukh S. P.** LCD based Micro – Stereolithography: A Novel Technique for Rapid Prototyping / 2nd National Conf. Recent Developments in Mechanical Engineering (RDME-2013), M. E. Society's College of Engineering, Pune, India // *IOSR J. Mech. & Civil Engineering*. 2013. P. 15–21.
18. **Pan Y., Chen Y., Yu Z.** Fast Mask Image Projection-Based Micro-Stereolithography Process for Complex Geometry // *J. Micro Nano-Manuf.* 2017. Vol. 5, N. 1. 8 p.
19. **O'Neill P. F.** Internal void fabrication via mask projection micro-stereolithography: A rapid repeatable microfluidic prototyping technique. Ph. D. Thesis, Dublin City University, 2018. 235 p.
20. **Geng Q., Wang D., Chen P., Chen S.-C.** Ultrafast multifocus 3-D nano-fabrication based on two-photon polymerization // *Nature Communications*. 2019. N. 10. 7 p.
21. **Saha S. K., Wang D., Nguyen V. H.** et al. Scalable sub-micrometer additive manufacturing // *Science*. 2019. Vol. 366, Is. 6461. P. 105–109.
22. **Park S. H., Lim T. W., Yang D.-Y.** Fabrication of a bunch of sub-30-nm nanofibers inside micro-channels using photopolymerization via a long exposure technique // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 89. P. 173131–173133.
23. **Guo R., Xiao S., Zhai X.** et al. Micro lens fabrication by means of femtosecond two photon photopolymerization // *Opt. Express*. 2006. Vol. 14, N. 2. P. 810–816.
24. **Chung T.-T., Tu Y.-T., Hsueh Y.-H.** et al. Micro-lens Array Fabrication by Two Photon Polymerization Technology // *Int. J. Automat. & Smart Technol.* 2013. Vol. 3, N. 2. P. 131–135.
25. **Ultraprecise 3D Microprinting for Optical and Photonic Components.** 2019. https://www.photonics.com/Articles/Ultraprecise_3D_Microprinting_for_Optical_and/a64047.
26. **Microlight 3D acquires SmartForceTech adding 2D capabilities to its micro-scale 3D printing technology.** 2019. <https://3d-prints.com/2019/04/17/microlight3d-acquires-smartforcetech-adding-2d-capabilities-to-its-micro-scale-3d-printing-technology/>.
27. **Wang J., Dai N., Jiang C.** et al. Programmable shape-shifting 3D structures via frontal photopolymerization // *Materials & Design*. 2020. Vol. 198. 9 p.
28. **Cabral J. T., Hudson S. D., Harrison C., Douglas J. F.** Frontal Photopolymerization for Microfluidic Applications // *Langmuir*. 2004. Vol. 20, Is. 23. P. 10020–10029.
29. **Aw J. E., Sottos N.** 3D Printing of Frontally Polymerizable Resins with Tunable Stiffness. <https://isgc.aerospace.illinois.edu/wp-content/uploads/2020/03/13-Sottos-Aw.pdf>.
30. **Lau G.-K., Shrestha M.** Ink-Jet Printing of Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) // *Micromachines*. 2017. N. 8. P. 194–213.
31. **Cox W. R., Guan C., Hayes D. J., Wallace D. B.** Microjet Printing of Micro-Optical Interconnects // *Int. J. Microcircuits & Elect. Packaging*. 2000. Vol. 23, N. 3. P. 346–351.
32. **Plevniak K.** 3D Printed Auto-mixing Chip Enables Rapid Smartphone Diagnosis of Anemia // *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2016. P. 267–270.
33. **Waheed S.** 3D printed microfluidic devices: enablers and barriers // *Lab Chip*. 2016. Vol. 16. P. 1993–2013.
34. **Saleh M. S., Hu C., Panat R.** Three-dimensional micro-architected materials and devices using nanoparticle assembly by pointwise spatial printing // *Science Adv.* 2017. Vol. 3, N. 3. 9 p.
35. **Ching T., Li Y., Karyappa R.** et al. Fabrication of integrated microfluidic devices by direct ink writing (DIW) 3D printing // *Sensors & Actuators: B. Chem.* 2019. Vol. 297. 9 p.
36. **Tyagi M., Spinks G. M., Jager E. W. H.** Fully 3D printed soft microactuators for soft microrobotics // *Smart. Mater. Struct.* 2020. Vol. 29. 12 p.
37. **Lewis J. A.** Novel Inks for Direct-Write Assembly of 3-D Periodic Structures // *Mater. Matters*. 2008. Vol. 3, N. 1. P. 4–7.
38. **King J., Rong W., Sun D.** et al. Extrusion printing for fabrication of spherical and cylindrical microlens arrays // *Appl. Opt.* 2016. Vol. 55, Is. 25. P. 6947–6952.
39. **Therriault D., White S., Lewis J.** Chaotic mixing in three-dimensional microvascular networks fabricated by direct-write assembly // *Nature Mater.* 2003. N. 2. P. 265–271.
40. **Cook K., Balle G., Canning J.** et al. Step-Index Optical Fibre Drawn from 3D Printed Preforms // *Optics Lett.* 2016. Vol. 41, Is. 19. P. 4554–4557.
41. **Regenfuss P., Ebert R., Exner H.** Laser Micro Sintering a Versatile Instrument for the Generation of Microparts // *Laser Technik J.* 2007. N. 1. P. 26–31.
42. **Nagarajan B. Hu Z., Song X.** et al. Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and Future Perspectives // *Engineering*. 2019. N. 5. P. 702–720.
43. **Froes F., Qian M., Niinomi M.** Titanium for Consumer Applications: Real-World Use of Titanium. Elsevier. 2019. 384 p.
44. **Murr L. E., Gaytan S. M., Martinez E.** et al. Next Generation Orthopaedic Implants by Additive Manufacturing Using Electron Beam Melting // *Int. J. Biomater.* 2012. Art. ID245727. 14 p.
45. **Lu K., Reynolds W. T.** 3DP process for ?ne mesh structure printing // *Powder Technol.* 2008. Vol. 187, Is. 1. P. 11–18.
46. **Mazzucato F.** Additive Manufacturing through Micro Direct Laser Metal Deposition Technology: Influence of the Material and Process Parameters on the Product Quality. Ph.D. Thesis. Universita degli Studi di Padova. 2017. 242 p.
47. **Baranowski P., Platek P., Antolak-Dudka A.** et al. Deformation of honeycomb cellular structures manufactured with Laser Engineered Net Shaping (LENS) technology under quasi-static loading: Experimental testing and simulation // *Addit. Manuf.* 2019. Vol. 25. P. 307–316.
48. **Zenou M., Kotler Z.** Printing of metallic 3D micro-objects by laser induced forward transfer // *Optics Express*. 2016. Vol. 24, N. 2. P. 1431–1446.
49. **Butt J., Mebrahtu H., Shirvani H.** Rapid prototyping by heat diffusion of metal foil and related mechanical testing // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 84, No. 9. P. 2357–2366.
50. **Dermeik B., Travitzky N.** Laminated Object Manufacturing of Ceramic-Based Materials // *Adv. Eng. Mater.* 2020. Vol. 22, Is. 9. 24 p.
51. **Bournias-Varotsis A., Wang S., Hutt D., Engstrum D. S.** The Effect of Ultrasonic Additive Manufacturing on Integrated Printed Electronic Conductors // *Electron. Mater. Lett.* 2018. Vol. 14, N. 4. P. 413–425.
52. **Suryavanshi A. P., Yua M.-F.** Probe-based electrochemical fabrication of freestanding Cu nanowire array // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 88. 3 p.
53. **Williams K. L., Köhler J., Bomana M.** Fabrication and mechanical characterization of LCVD deposited carbon micro-springs // *Sensors & Actuators A*. 2006. Vol. 130-131. P. 358–364.
54. **Matsui S.** Three-Dimensional Nanostructure Fabrication by Focused Ion Beam Chemical Vapor Deposition // In *Springer Handb. Nanotechnol.* (Bhushan P. B.). P. 211–229 (Springer, Berlin, Germany, 2010). http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-02525-9_7.
55. **Winkler R., Fowlkes J. D., Rack P. D., Plank H.** 3D nanoprinting via focused electron beams // *J. Appl. Phys.* 2019. Vol. 125. P. 210901-1–210901-14.
56. **Kuwabata S., Minamimoto H., Inoue K.** et al. Three-dimensional micro/nano-scale structure fabricated by combination of non-volatile polymerizable RTIL and FIB irradiation // *Sci. Rep.* 2014. N. 4. 6 p.
57. **Minamimoto H., Irie H., Uematsu T.** et al. Polymerization of Room-Temperature Ionic Liquid Monomers by Electron Beam Irradiation with the Aim of Fabricating Three-Dimensional Micropolymer / Nanopolymer Structures // *Langmuir*. 2014. Vol. 31, no 14. P. 4281–4289.
58. **Li F., Macdonald N. P., Guijt R. M., Breadmore M. C.** Increasing the functionalities of 3D printed microchemical devices by single material, multimaterial and print-pause-print 3D printing // *Lab. Chip*. 2019. Vol. 19. P. 35–49.
59. **Herzog H.** Optical fabrication of lightweighted 3D printed mirrors // *Optomechanical Engineering*. Ed. A. E. Hatheway // *Proc. SPIE*. 2015. Vol. 9573. P. 957308-1–957308-15.

Corresponding author:

Tolochko Nicolay K., Full Professor, Dr. Sc (Phys & Math),
Byelorussian State Agrarian Technical University, Minsk, 220023, Republic of Belarus
e-mail: n.tolochko@hotmail.com

Application of Additive Technologies for Manufacturing Non-Electronic Components of Microsystems

Received on April 06, 2021

Accepted on April 30, 2021

It is problematic to apply traditional microtechnologies for the manufacturing three-dimensional (3D) components of microsystems due to a number of inherent disadvantages. It is much more promising to use additive technologies for these purposes. In present paper various additive technologies used for manufacturing non-electronic components of microsystems as well as various non-electronic components manufactured using these technologies are considered. The peculiarities of the implementation of additive technologies in the manufacture of non-electronic microcomponents are discussed.

More than 20 types of additive technologies characterized by different principles for the implementation of 3D printing processes are presented and their brief description is given. Most of these technologies allow manufacturing the components with micrometer feature sizes and some of them — with nanometer feature sizes. Microcomponents produced by additive technologies are intended for use in micromechanics, microoptics and microfluidics. Many examples of such microcomponents are given with indication of their typical feature sizes.

Additive technologies make it possible to create both individual parts of microdevices and completely finished microdevices. Microcomponents are mainly made from photopolymers and thermoplastics, as well as metals. Among additive technologies those that provide the multi-material 3D printing as well as the embedding of discrete components into printed microdevices are especially promising. It is expected that in near future additive technologies will be widely used in the production of various non-electronic components of microsystems.

Keywords: additive technologies, manufacturing, non-electronic microcomponents, micromechanics, microoptics, microfluidics, feature sizes, materials

For citation:

Tolochko N. K. Application of Additive Technologies for Manufacturing Non-Electronic Components of Microsystems, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 193–200.

doi: 10.17587/nmst.23.193-200

References

1. Verner V. D., Ivanov A. A., Kolomenskaja N. G. et al. Izde-lija mikrosistemnoi tekhniki — osnovnye ponjatija i terminy, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2007, no. 12, pp. 2–5 (in Russian).
2. Kumar S., Bhushan P., Pandey M., Bhattacharya S. Additive manufacturing as an emerging technology for fabrication of microelectromechanical systems (MEMS), *J. Micromanufacturing*, 2019, vol. 2, is. 2, pp. 1–23.
3. Walczak R. Inkjet 3D printing — towards new microma-chining tool for MEMS fabrication, *Bull. Pol. Ac.: Tech.*, 2018, vol. 66, no 2, pp. 179–186.
4. Ertugrul I., Akkus N., Yuce H. Fabrication of MEMS-based electrothermal microactuators with additive manufacturing technologies, *Mater. & Technol.*, 2019, vol. 53, no 5, pp. 665–670.
5. Stampfl J., Baudis S., Heller C. et al. Photopolymers with tunable mechanical properties processed by laser-based high-res-olution stereolithography, *J. Micromech. Microeng.*, 2008, vol. 18, no. 12, 9 p.
6. Zhang X., Jiang X., Sun C. Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures, *Sensors Actuators A Phys.*, 1999, vol. 77, pp. 149–156.
7. Mohamed M. G. A. Rapid and Inexpensive Fabrication of Multi-Depth Microfluidic Device using High-Resolution LCD

Stereolithographic 3D Printing, *J. Manuf. Mater. Process.*, 2019, vol. 3, no. 26, 11 p.

8. Zhakeyev A., Wang P., Li Z. et al. Additive Manufacturing: Unlocking the Evolution of Energy Materials, *Advanced Science*, 2017, vol. 4, no. 10, 44 p.

9. Sun C., Fang N., Wu D. M., Zhang X. Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask, *Sensors Actuators A: Phys.*, 2005, vol. 212, is. 1, pp. 113–20.

10. Behroodi E., Lati H., Naja F. A compact LeD-based projection microstereolithography for producing 3D microstruc-tures, *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 1, 14 p.

11. Zheng X., Deotte J., Alonso M. P. et al. Design and op-timization of a light-emitting diode projection micro-stereo-lithography three-dimensional manufacturing system, *Rev. Sci. Instrum.*, 2012, vol. 83, 8 p.

12. Kim S., Handler J. J., Cho Y. T. et al. Scalable additive manufacturing via integral image formation, 2019. <https://www.researchsquare.com/article/rs-85511/v1>.

13. Wu J., Guo X., Zhang A. P., Tam H.-Y. Rapid 3D μ -prin-ting of polymer optical whispering-gallery mode resonators, *Op-tics Express*, 2015, vol. 23, is. 23, pp. 29708–29714.

14. Rogers C. I., Qaderi K., Woolley A. T., Nordin G. P. 3D printed microfluidic devices with integrated valves, *Biomicrofui-dics*, 2015, vol. 9, pp. 016501-1–016501-9.

15. **Majors R. E.** Highlights of HPLC 2017 Jeju, *LCGC North America*, 2018, vol. 36, is. 3, pp. 94–99.
16. **Gong H.** Custom 3D printer and resin for 18 μm \times 20 μm microfluidic flow channels, *Lab Chip.*, 2017, vol. 17, is. 17, pp. 2899–2909.
17. **Suryatal B. K., Deshmukh S. P.** LCD based Micro – Stereolithography: A Novel Technique for Rapid Prototyping, 2nd National Conf. Recent Developments in Mechanical Engineering (RDME-2013), M. E. Society's College of Engineering, Pune, India, *IOSR J. Mech. & Civil Engineering*, 2013, pp. 15–21.
18. **Pan Y., Chen Y., Yu Z.** Fast Mask Image Projection-Based Micro-Stereolithography Process for Complex Geometry, *J. Micro Nano-Manuf.*, 2017, vol. 5, no. 1, 8 p.
19. **O'Neill P. F.** Internal void fabrication via mask projection micro-stereolithography: A rapid repeatable microfluidic prototyping technique. PhD Thesis, Dublin City University, 2018, 235 p.
20. **Geng Q., Wang D., Chen P., Chen S.-C.** Ultrafast multi-focus 3-D nano-fabrication based on two-photon polymerization, *Nature Communications*, 2019, no. 10, 7 p.
21. **Saha S. K., Wang D., Nguyen V. H.** et al. Scalable submicrometer additive manufacturing, *Science*, 2019, vol. 366, is. 6461, pp. 105–109.
22. **Park S. H., Lim T. W., Yang D.-Y.** Fabrication of a bunch of sub-30-nm nanofibers inside micro-channels using photopolymerization via a long exposure technique, *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, pp. 173131–173133.
23. **Guo R., Xiao S., Zhai X.** et al. Micro lens fabrication by means of femtosecond two photon photopolymerization, *Opt. Express.*, 2006, vol. 14, no. 2, pp. 810–816.
24. **Chung T.-T., Tu Y.-T., Hsueh Y.-H.** et al. Micro-lens Array Fabrication by Two Photon Polymerization Technology, *Int. J. Automat. & Smart Technol.*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 131–135.
25. **Ultraprecise 3D Microprinting for Optical and Photonic Components.** 2019. https://www.photonics.com/Articles/Ultraprecise_3D_Microprinting_for_Optical_and/a64047.
26. **Microlight 3D** acquires SmartForceTech adding 2D capabilities to its micro-scale 3D printing technology. 2019. <https://3d-prints.com/2019/04/17/microlight3d-acquires-smartforcetech-adding-2d-capabilities-to-its-micro-scale-3d-printing-technology/>.
27. **Wang J., Dai N., Jiang C.** et al. Programmable shape-shifting 3D structures via frontal photopolymerization, *Materials & Design*, 2020, vol. 198, 9 p.
28. **Cabral J. T., Hudson S. D., Harrison C., Douglas J. F.** Frontal Photopolymerization for Microfluidic Applications, *Langmuir*, 2004, vol. 20, is. 23, pp. 10020–10029.
29. **Aw J. E., Sottos N.** 3D Printing of Frontally Polymerizable Resins with Tunable Stiffness. <https://isgc.aerospace.illinois.edu/wp-content/uploads/2020/03/13-Sottos-Aw.pdf>.
30. **Lau G.-K., Shrestha M.** Ink-Jet Printing of Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS), *Micromachines*, 2017, no. 8, pp. 194–213.
31. **Cox W. R., Guan C., Hayes D. J., Wallace D. B.** Microjet Printing of Micro-Optical Interconnects, *Int. J. Microcircuits & Elect. Packaging*, 2000, vol. 23, no. 3, pp. 346–351.
32. **Plevniak K.** 3D Printed Auto-mixing Chip Enables Rapid Smartphone Diagnosis of Anemia, *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, 2016, pp. 267–270.
33. **Waheed S.** 3D printed microfluidic devices: enablers and barriers, *Lab Chip.*, 2016, vol. 16, pp. 1993–2013.
34. **Saleh M. S., Hu C., Panat R.** Three-dimensional micro-architected materials and devices using nanoparticle assembly by pointwise spatial printing, *Science Adv.*, 2017, vol. 3, no. 3, 9 p.
35. **Ching T., Li Y., Karyappa R.** et al. Fabrication of integrated microfluidic devices by direct ink writing (DIW) 3D printing, *Sensors & Actuators: B. Chem.*, 2019, vol. 297, 9 p.
36. **Tyagi M., Spinks G. M., Jager E. W. H.** Fully 3D printed soft microactuators for soft microrobotics, *Smart. Mater. Struct.*, 2020, vol. 29, 12 p.
37. **Lewis J. A.** Novel Inks for Direct-Write Assembly of 3-D Periodic Structures, *Mater. Matters*, 2008, vol. 3, no. 1, pp. 4–7.
38. **King J., Rong W., Sun D.** et al. Extrusion printing for fabrication of spherical and cylindrical microlens arrays, *Appl. Opt.*, 2016, vol. 55, is. 25, pp. 6947–6952.
39. **Therriault D., White S., Lewis J.** Chaotic mixing in three-dimensional microvascular networks fabricated by direct-write assembly, *Nature Mater.*, 2003, no. 2, pp. 265–271.
40. **Cook K., Balle G., Canning J.** et al. Step-Index Optical Fibre Drawn from 3D Printed Preforms, *Optics Lett.*, 2016, vol. 41, is. 19, pp. 4554–4557.
41. **Regenfuss P., Ebert R., Exner H.** Laser Micro Sintering a Versatile Instrument for the Generation of Microparts, *Laser Technik J.*, 2007, no. 1, pp. 26–31.
42. **Nagarajan B. Hu Z., Song X.** et al. Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and Future Perspectives, *Engineering*, 2019, no. 5, pp. 702–720.
43. **Froes F., Qian M., Niinomi M.** Titanium for Consumer Applications: Real-World Use of Titanium. Elsevier, 2019. 384 p.
44. **Murr L. E., Gaytan S. M., Martinez E.** et al. Next Generation Orthopaedic Implants by Additive Manufacturing Using Electron Beam Melting, *Int. J. Biomater.*, 2012, art. ID245727, 14 p.
45. **Lu K., Reynolds W. T.** 3DP process for fine mesh structure printing, *Powder Technol.*, 2008, vol. 187, is. 1, pp. 11–18.
46. **Mazzucato F.** Additive Manufacturing through Micro Direct Laser Metal Deposition Technology: Influence of the Material and Process Parameters on the Product Quality. Ph.D. Thesis. Università degli Studi di Padova. 2017. 242 p.
47. **Baranowski P., Platek P., Antolak-Dudka A.** et al. Deformation of honeycomb cellular structures manufactured with Laser Engineered Net Shaping (LENS) technology under quasi-static loading: Experimental testing and simulation, *Addit. Manuf.*, 2019, vol. 25, pp. 307–316.
48. **Zenou M., Kotler Z.** Printing of metallic 3D micro-objects by laser induced forward transfer, *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 2, pp. 1431–1446.
49. **Butt J., Mebrahtu H., Shirvani H.** Rapid prototyping by heat diffusion of metal foil and related mechanical testing, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2016, vol. 84, no. 9, pp. 2357–2366.
50. **Dermeik B., Travitzky N.** Laminated Object Manufacturing of Ceramic-Based Materials, *Adv. Eng. Mater.*, 2020, vol. 22, is. 9, 24 p.
51. **Bournias-Varotsis A., Wang S., Hutt D., Engstrum D. S.** The Effect of Ultrasonic Additive Manufacturing on Integrated Printed Electronic Conductors, *Electron. Mater. Lett.*, 2018, vol. 14, no. 4, pp. 413–425.
52. **Suryavanshi A. P., Yua M.-F.** Probe-based electrochemical fabrication of freestanding Cu nanowire array, *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 88, 3 p.
53. **Williams K. L., Köhler J., Bomana M.** Fabrication and mechanical characterization of LCVD deposited carbon micro-springs, *Sensors & Actuators A*, 2006, vol. 130–131, pp. 358–364.
54. **Matsui S.** Three-Dimensional Nanostructure Fabrication by Focused Ion Beam Chemical Vapor Deposition. In Springer Handb. Nanotechnol. (Bhushan P. B.). P. 211–229 (Springer, Berlin, Germany, 2010). http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-02525-9_7.
55. **Winkler R., Fowlkes J. D., Rack P. D., Plank H.** 3D nano-printing via focused electron beams, *J. Appl. Phys.*, 2019, vol. 125, pp. 210901-1–210901-14.
56. **Kuwabata S., Minamimoto H., Inoue K.** et al. Three-dimensional micro/nano-scale structure fabricated by combination of non-volatile polymerizable RTIL and FIB irradiation, *Sci. Rep.*, 2014, no. 4, 6 p.
57. **Minamimoto H., Irie H., Uematsu T.** et al. Polymerization of Room-Temperature Ionic Liquid Monomers by Electron Beam Irradiation with the Aim of Fabricating Three-Dimensional Micropolymer / Nanopolymer Structures, *Langmuir*, 2014, vol. 31, no. 14, pp. 4281–4289.
58. **Li F., Macdonald N. P., Guijt R. M., Breadmore M. C.** Increasing the functionalities of 3D printed microchemical devices by single material, multimaterial and print-pause-print 3D printing, *Lab. Chip.*, 2019, vol. 19, pp. 35–49.
59. **Herzog H.** Optical fabrication of lightweighted 3D printed mirrors. Optomechanical Engineering. Ed. A. E. Hatheway, *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9573, pp. 957308-1–957308-15.

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,
А. А. Трофимов¹, канд. техн. наук, стар. науч. сотр., aa-trofimov@yandex.ru,
В. Р. Скрынский², ассистент, vlad_ckr@mail.ru

¹Федеральное государственное автономное научное учреждение

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова
Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Москва

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

РАЗВИТИЕ АПЕРТУРНО- И ЕМКОСТНО-СВЯЗАННЫХ АНТЕНН. ОБЗОР

Поступила в редакцию 04.06.2021

Описаны примеры реализации и защищаемые патентами разновидности апертурно- и емкостно-связанных антенн для систем на кристалле.

Ключевые слова: антенны, апертурно-связанные антенны, емкостно-связанные антенны, миллиметровый диапазон длин волн

Целью оптимизации антенны является достижение в заданной полосе частот максимального коэффициента усиления диаграммы направленности (КУДН) при минимальных габаритных размерах и требованиях технологии. Особое значение имеют вопросы широкополосности излучателя, так как именно излучатель является критическим элементом при решении задачи создания широкополосного тракта. В настоящее время технологический базис позволяет создавать многослойные конструкции антенн. Апертурно-связанные антенны, Aperture Coupled Antenna (ACA), именуемые также "aperture-coupling patch antenna (АСРА)", "microstrip patch antenna (МРА) using aperture coupling feeding technique", основаны на связи излучающего проводника с подводящей линией (фидером) через щель (апертуру) в экранирующем проводящем слое и позволяют обеспечить требуемые характеристики при минимальной площади антенны, что является существенным преимуществом перед антеннами, описанными в работе [1].

В настоящей работе рассматривается развитие АСА, а также близких к АСА по строению антенн с емкостной связью (proximity coupled), проводников в различных слоях. Как и ранее, моноподем именуется часть проводящего слоя, активный моноподем имеет омическое соединение с подводящей линией (фидером), через которую сигнал поступает в антенну, пассивный моноподем изолирован от иных проводников. Интенсивное развитие многослойных антенн с апертурно- и емкостно-связанными проводниками стимулируется потребностями применения в составе ППМ, для которых, как правило, критичны размеры. По площади АСА близка к моноподему, но обеспечивает существенно большую рабочую полосу частот.

Разрабатываются следующие модификации АСА:

- с дополнительными слоями с метаструктурами или с моноподемами;
- с использованием в верхнем слое нескольких монополей;

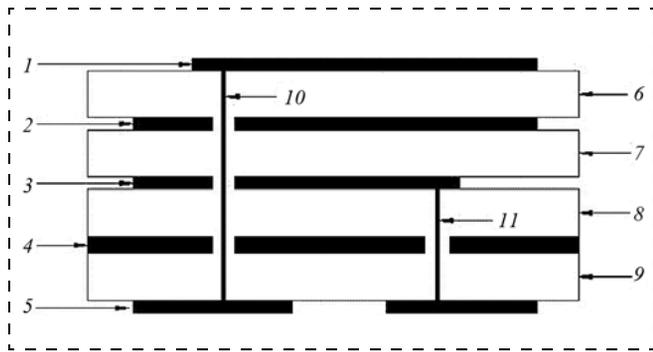


Рис. 3. Сечение антенны:

1 — слой монополей; 2 — экранирующий слой с щелями; 3 — подводящие линии АСА; 4 — экранирующий слой; 5 — слой подводящих фидеров к портам 10 и 11; 6–9 — диэлектрические слои

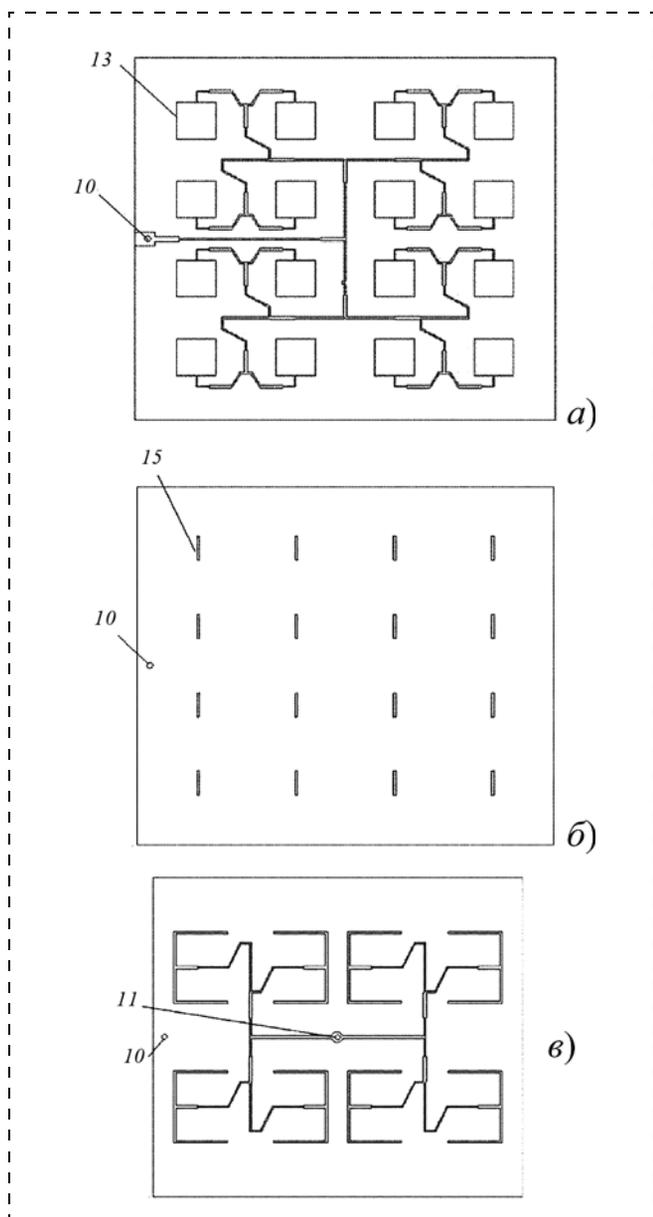


Рис. 4. Топология верхнего слоя АСА (а); топология металлического заземляющего слоя с щелями (б); топология подводящих линий АСА (в)

- с соединением фрагментов верхнего проводящего слоя с экранирующим слоем;
- с использованием диэлектрических резонаторов (ДР);
- с различными вариантами подводящей линии (микростриповая, копланарная линия, surface integrated waveguide (SIW) волновод);
- последовательное соединение апертурно-связанных излучателей.

Обычная АСА имеет три слоя металлизации: нижний с подводящей линией, средний слой — экран с щелью и пассивный монополярный элемент в верхнем проводящем слое (рис. 1, см. вторую сторону обложки) [2]. Форма проводников оптимизируется согласно требованиям широкополосности, направленности и поляризации.

АСА с четырьмя соединенными монополями (рис. 2, см. вторую сторону обложки) имеет ширину рабочей полосы 8,33 % для 60 ГГц и КУДН 10,5 дБи [3]. Решетка из 8×8 излучателей имеет шаг 7 мм (1,4λ).

Решетка АСА, совмещенная с подводом сигнала проводником непосредственно на монополярный элемент, описана в патенте [4]. Сечение антенны и топология проводящих слоев показаны на рис. 3 и 4. Предложенная решетка АСА имеет дополни-

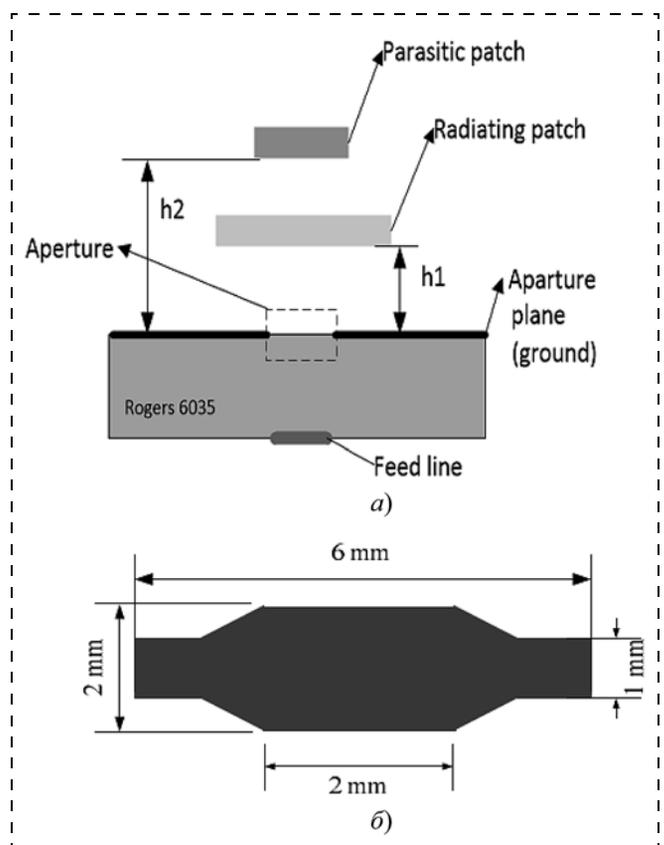


Рис. 5. Сечение АСА (а); топология щели (б)

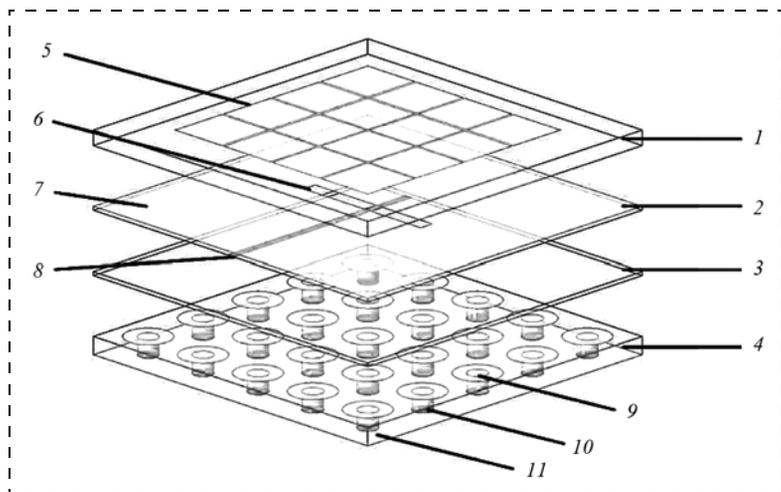


Рис. 6. Структура АСА:

1–4 — диэлектрические слои; 5 — верхний проводящий слой; 6 — щель; 7 — экранирующий проводящий слой; 8 — микрополосковая линия; 9 — метаструктура; 10 — межслойное соединение; 11 — нижний проводящий слой

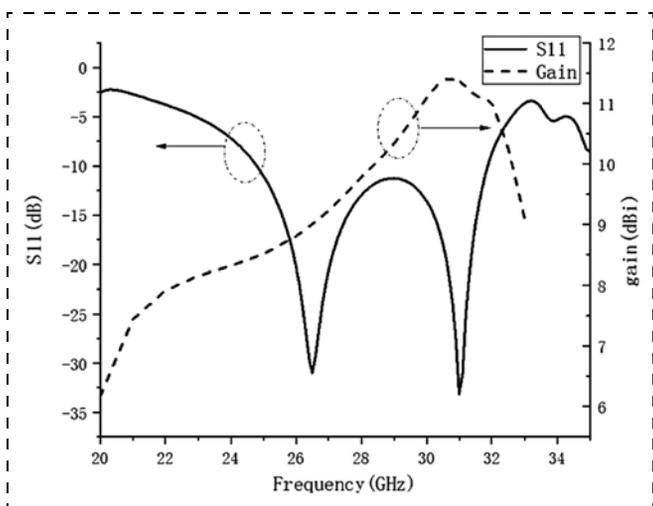


Рис. 7. АЧХ и частотная зависимость КУДН излучателя

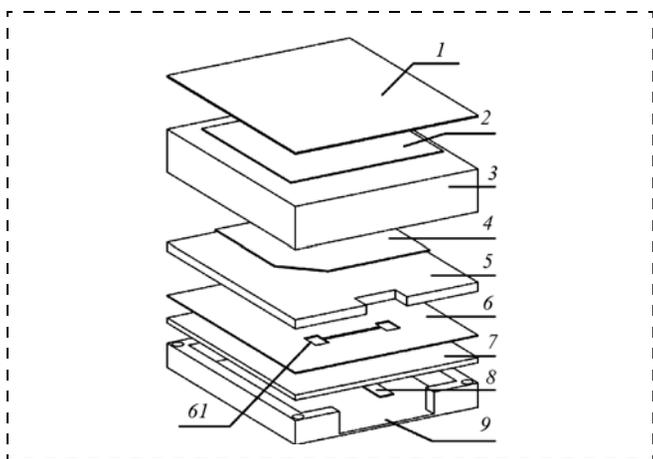


Рис. 8. Структура АСА с тремя монополями:

1, 2, 4 — пассивные монополи; 3, 5, 7 — диэлектрики; 6 — экранирующий проводящий слой; 8 — микрополосковая линия; 9 — нижний проводящий слой

тельное соединение монополей микрополосковыми линиями к общему порту 10 (рис. 4, а). Подводящие линии АСА в нижнем слое металлизации (слой 3 на рис. 3) соединены со вторым общим портом 11 (рис. 4, в). Утверждается, что данная решетка обеспечивает независимую передачу через порт 10 на частоте 14,25 ГГц и прием на частоте 12,5 ГГц через порт 11 с развязкой более 35 дБ.

АСА с двумя пассивными монополями (рис. 5) обеспечивает полосу 10,5...14,5 ГГц при КУДН более 7 дБи за счет оптимизации формы щели [5].

Нижний проводящий слой АСА выполнен как метаструктура 9, верхний проводящий слой 5 разрезан на 16 пассивных монополей (рис. 6). Достигнут КУДН более 10 дБи в полосе 26...32 ГГц (рис. 7) [6].

Предложена АСА с тремя монополями (рис. 8), полоса которой составляет 21 % от центральной частоты [7]. Над щелью 61 реализованы три слоя пассивных монополей 1, 2, 4. Рабочая полоса частот 1,9...2,6 ГГц.

Введение четвертого проводящего слоя с метаструктурами (рис. 9) позволило обеспечить

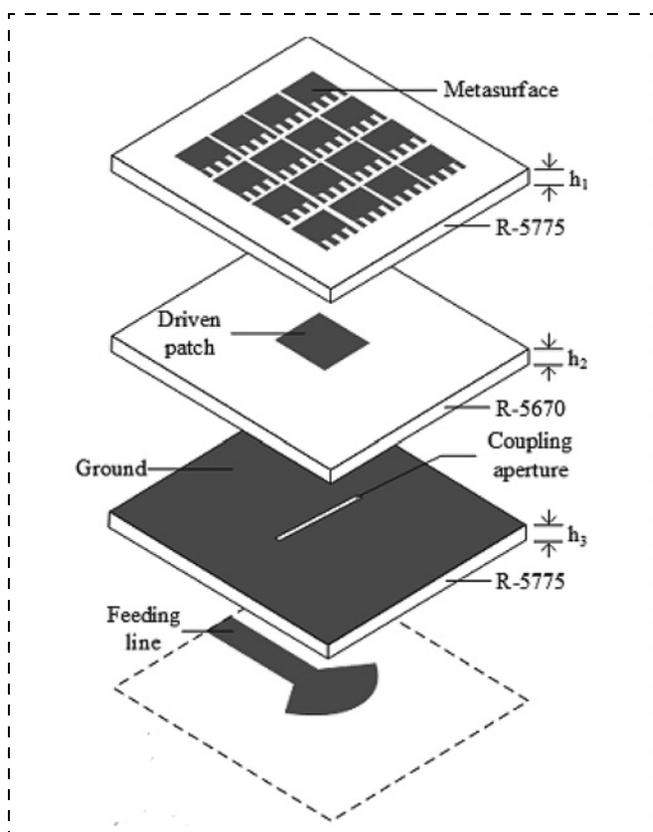


Рис. 9. Структура антенны

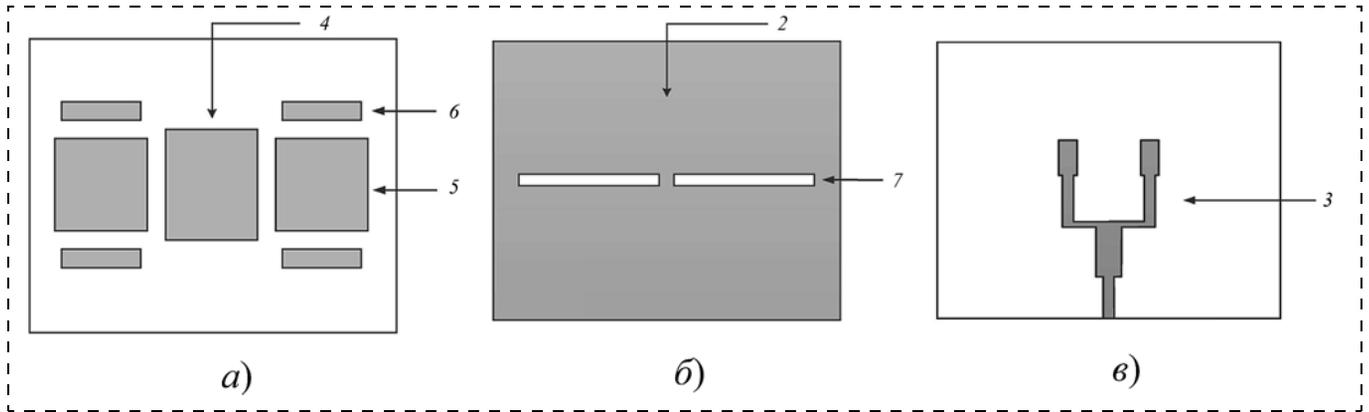


Рис. 10. Топология проводящих слоев АСА:

a — верхний слой; *б* — средний слой 2; *в* — нижний слой (подводящая линия 3)

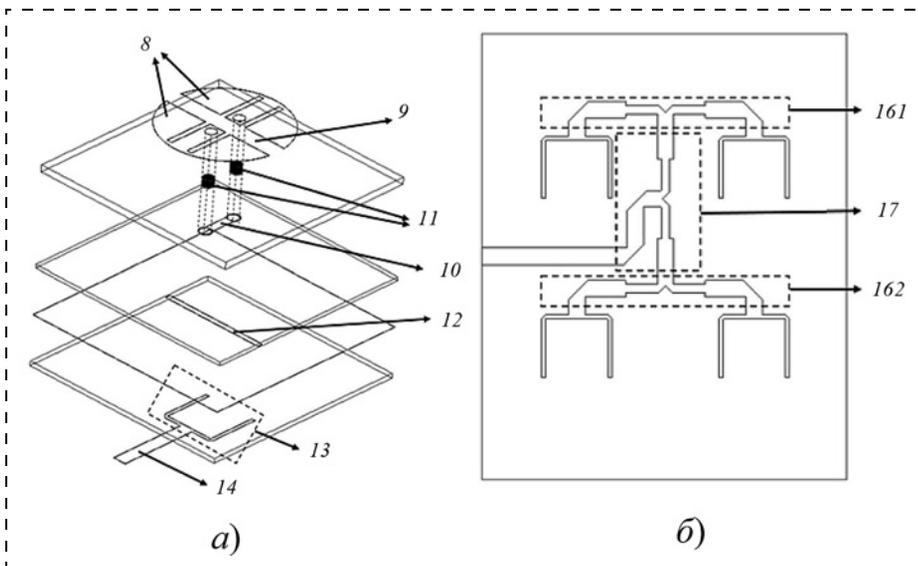


Рис. 11. Излучатель:

a — строение; *б* — топология

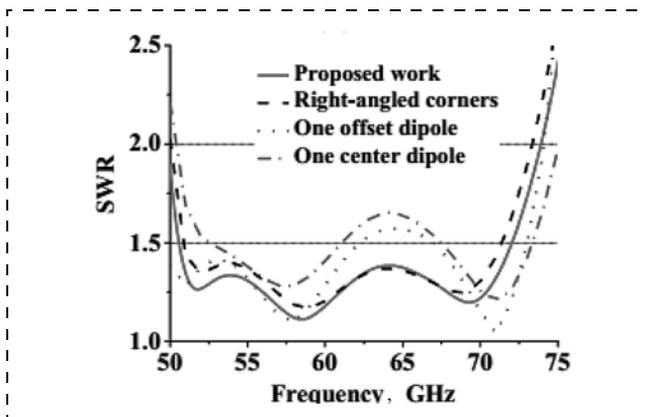


Рис. 13. АЧХ излучателя

рабочую полосу частот 28...56 ГГц при КУДН более 5 дБи [8].

АСА с несколькими пассивными излучателями (рис. 10, *a*) и (*4–б*) двумя щелями (рис. 10, *б*) показала при размерах 26×21×5 мм рабочую по-

лосу частот более октавы (5,26...13 ГГц) [9].

Модификация АСА с четырьмя проводящими слоями, в которой верхний монополь 8 выполнен составным и соединен межслойными соединениями 11 с закороткой 10 над щелью 11 в экранирующем слое (рис. 11), защищена в патенте [10]. Рабочая полоса двух реализаций составляет 27...34 ГГц и 22,9...40 ГГц.

Значительную полосу (50...74 ГГц) при КУДН до 8,7 дБи обеспечивает излучатель, запитываемый от SIW-структуры с тремя слоями металлизации размером 5×5 мм

(рис. 12, см. вторую сторону обложки) [11]. В нем реализован экранирующий слой металла над SIW-волноводом с продольной прорезью Slot1, средний слой металла с прорезью, верхний слой металла, в котором реализованы проводники (dipoles), и проводящий периметр размером E1, соединенные со средним слоем. Сигнал подается через волновод SIW feed (input port). Частотная зависимость коэффициента отражения при различных координатах диполей показана на рис. 13. Описаны разработанные антенные решетки 4×4 и 8×8 размерами 14,4×14,4 мм и 28,8×28,8 мм (шаг решетки примерно 0,7λ).

Излучатель вида, показанного на рис. 14 (см. третью сторону обложки) обеспечивает согласование в субмиллиметровом диапазоне 124...158 ГГц. Сигнал к излучателю подводится снизу через многослойную SIW-структуру с щелями в экранирующих проводящих слоях [12].

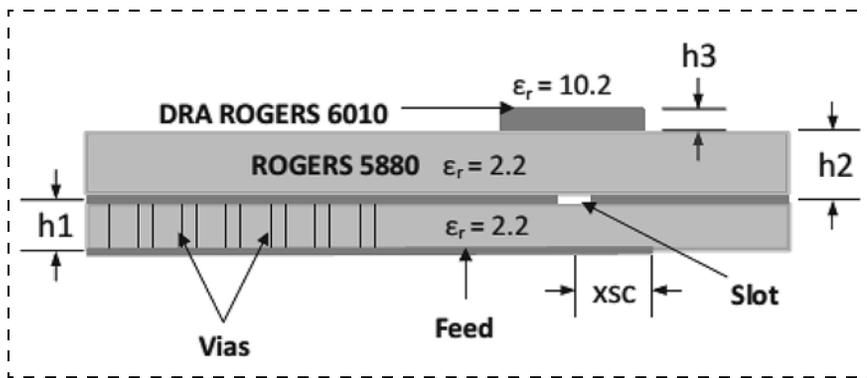


Рис. 15. Сечение антенны

Антенна, описанная в работе [13], выше щели имеет диэлектрический прямоугольник (DRA Rogers 6010) размером $3,2 \times 2,7 \times 0,64$ мм (рис. 15). Для антенной решетки из 1×8 излучателей с расстоянием между центрами излучателей $\lambda/4$ моделированием получена рабочая полоса частот 29,8...34,2 ГГц.

Для АСА с ДР рассмотрено влияние слоев с метаструктурами (superstrates), показанных на рис. 16. Без метаструктур получено согласование с одним минимумом с АЧХ входа на частоте 5,7 ГГц при КУДН = 5,7 дБи, введение одного слоя с метаструктурами выше резонатора увеличивает его на 3,3 дБи, введение двух слоев — на 4,3 дБи [14].

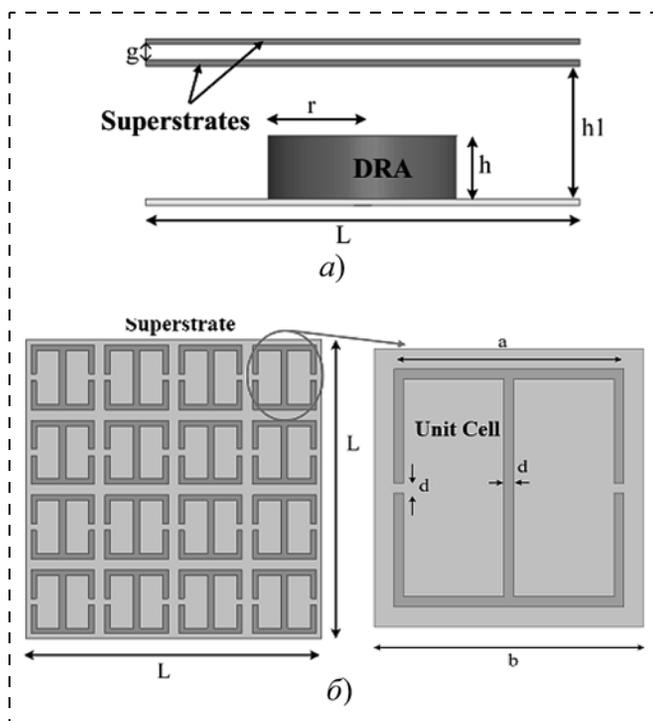


Рис. 16. Сечение излучателя (а); топология метаструктур (б)

Проведена оптимизация излучателя с двумя ДР (конечные параметры $\epsilon = 9,4$, $D = 6$ мм, $h = 9$ мм) и при ступенчатой щели (рис. 17). Получен требуемый уровень отражения (-10 дБ) в полосе 3,6...18 дБ при КУДН 6...8 дБи [15, 16]. Проведенное сравнение данной антенны с аналогами показало, что достигнута максимальная рабочая полоса частот при минимальных размерах $30 \times 25 \times 9,8$ мм. Упомянуты также исследования излучателей

с тремя и четырьмя ДР, но прироста полосы частот для них не получено.

Разработана АР 8×8 на основе SIW с диэлектрическими прямоугольниками (dielectric block) [17]. АР имеет три слоя металлизации: нижний земляной; средний экранирующий с щелями; верхний слой с щелями (рис. 18). В полосе 35,20...38,50 ГГц получен уровень отражения

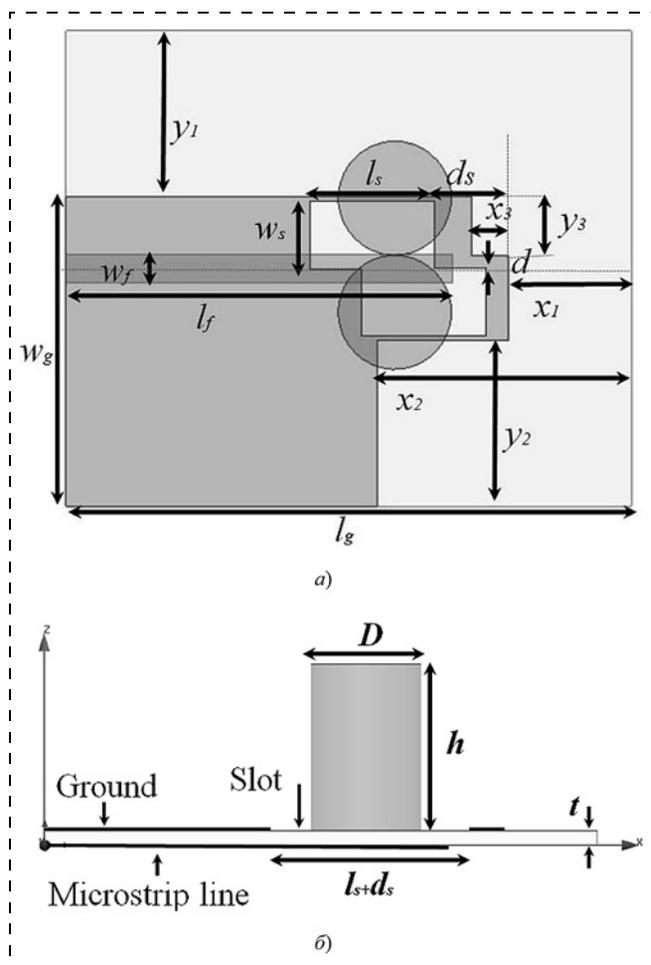


Рис. 17. Структура излучателя с ДР: а — топология; б — сечение

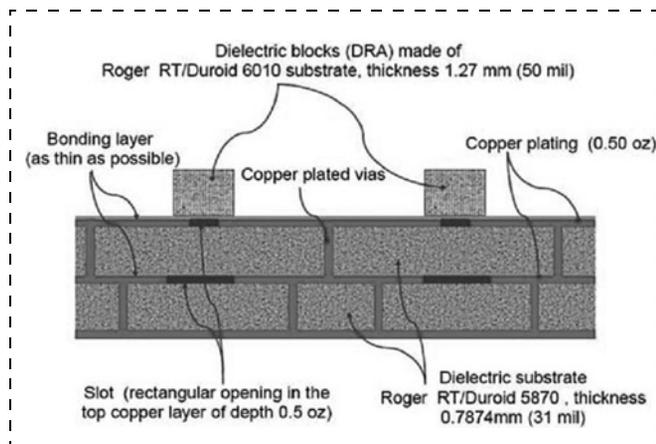


Рис. 18. Сечение антенной решетки с ДР

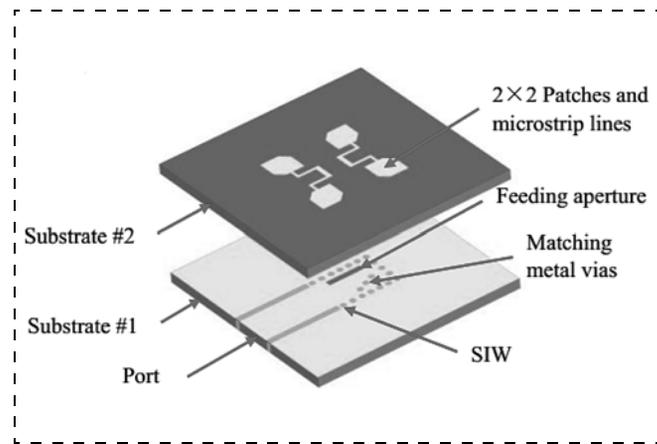


Рис. 21. Строение АСА с соединенными монополями

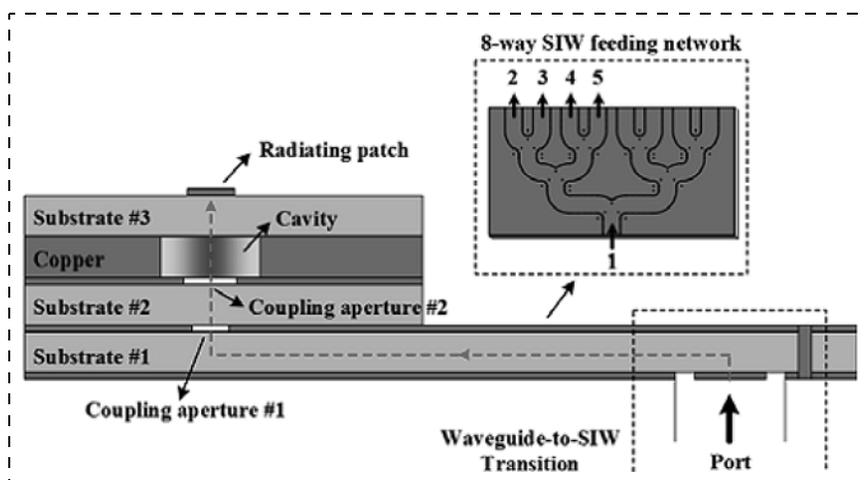


Рис. 19. АСА, возбуждаемая SIW-волноводом

входа $S_{11} < 15$ дБ и уровень КУДН более 20 дБи при расстоянии между излучателями $0,56\lambda$.

АСА, возбуждаемая SIW-волноводом (рис. 19), описана в работе [18]. Топология слоев показана на рис. 20. Получена полоса 26,55... 29,65 ГГц. Расстояние между излучателями $0,75\lambda$ на частоте 28,25 ГГц.

АСА с верхним слоем металлизации вида пары соединений монополей (рис. 21) при соединении щелью с SIW-волноводом обеспечивает рабочую полосу 50...72 ГГц при КУДН более 10 дБи [19].

Предложена антенна (рис. 22), в которой левая часть представляет обычную АСА (монополюль 1, щель 6 в экранирующем проводящем слое 5), сигнал подается на фидер 14. На правую часть антенны (монополюль 2, щель 7, SIW-волновод 9)

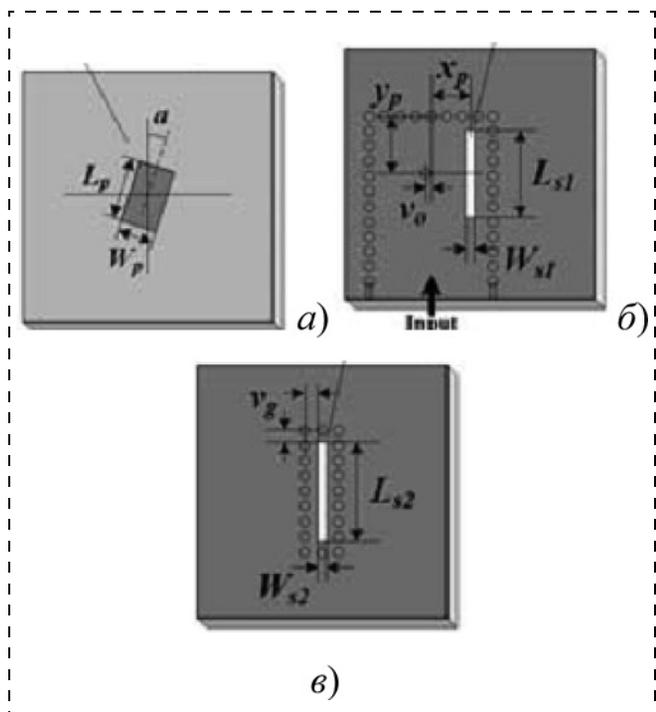


Рис. 20. Топология верхнего проводящего слоя (монополюль) (а), второго (б) и третьего (в) слоев с щелями

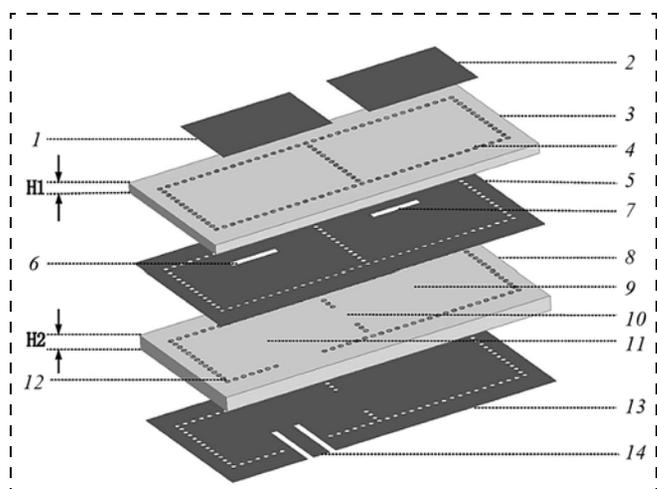


Рис. 22. Топология слоев излучателя

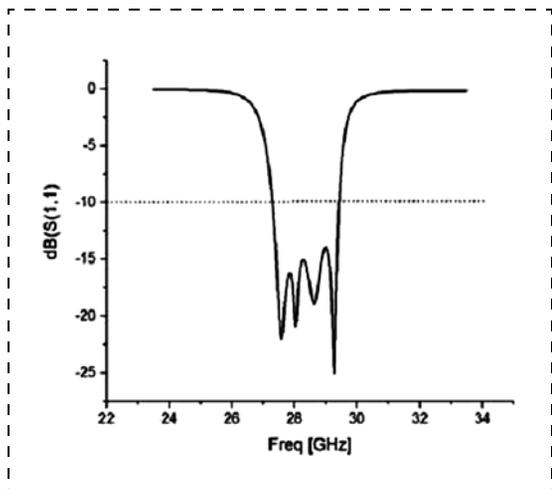


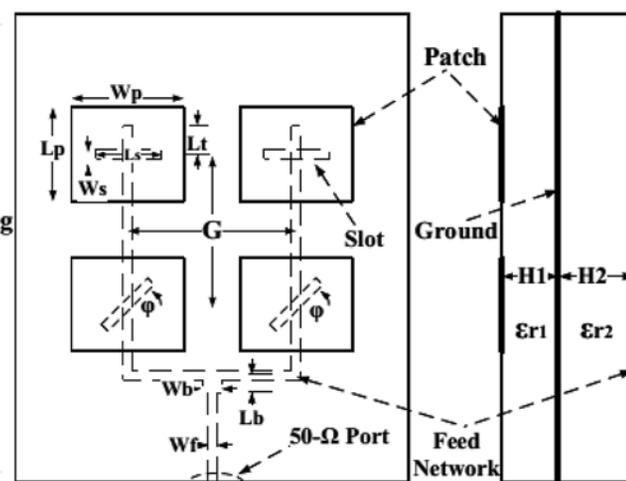
Рис. 23. АЧХ излучателя

сигнал подается через диафрагму 10 из SIW-волновода 11 [20]. Слои 3, 8 — диэлектрик; 4, 12 — межслойное соединение; 13 — нижний проводящий слой; 14 — копланарная линия. Получено высокое согласование с трактом в полосе 27,0...29,4 ГГц (рис. 23).

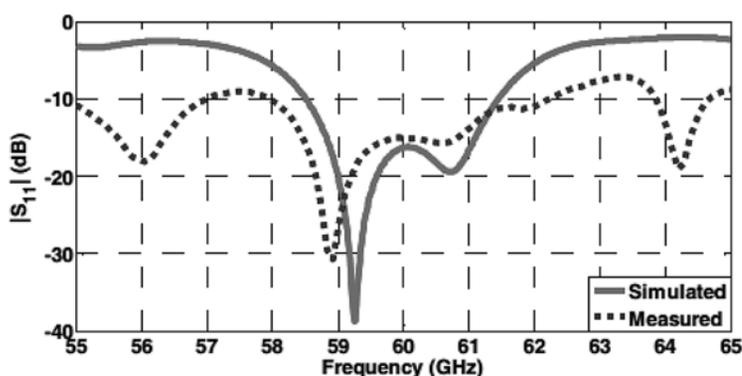
Решетка из попарного соединения АСА (рис. 24) имеет незначительное превышение измеренного коэффициента отражения S11 над пороговым уровнем -10 дБ в полосе 55...65 ГГц, которое скорее всего может быть устранено оптимизацией топологии или дополнительными шлейфами [21].

Исследована линейная АР с трехслойной металлизацией (рис. 25) [22]. Пассивный монополярный элемент (patch element) расположен в верхнем слое металлизации над разрывом в подводящей линии (feedline). Расстояние между центрами монополярных элементов, обозначенное как SP, приблизительно 7,38 мм (0,68λ для 27,5 ГГц). Получена рабочая полоса частот 26,4...28,92 ГГц и КУДН более 13,83 дБи.

Линейная решетка из четырех АСА с полосой частот 3,34...7,53 ГГц (77 %) показана на рис. 26 (см. третью сторону обложки) [23, 24]. Нижний слой металлизации обозначен темно-серым цветом, средний слой металлизации со щелями — голубым, верхний слой — фиолетовым. Подводящая линия, выполненная в нижнем слое металлизации, имеет на конце симметричные Т-образные шлейфы. Решетка состоит из двух пар антенн, в каждой паре антенны соединены последовательно через микрополосковую линию с Т-образными шлейфами.

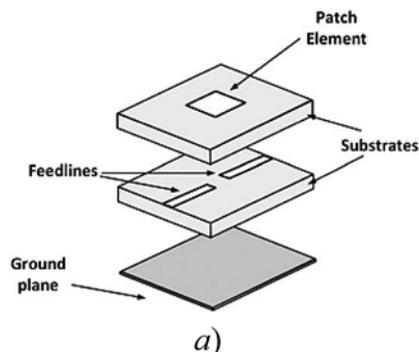


а)

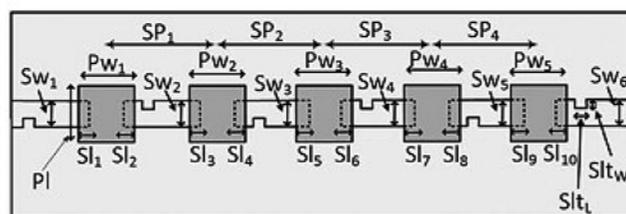


б)

Рис. 24. Структура и характеристики антенны с попарным соединением



а)



б)

Рис. 25. Структура:

а — излучателя; б — антенной решетки

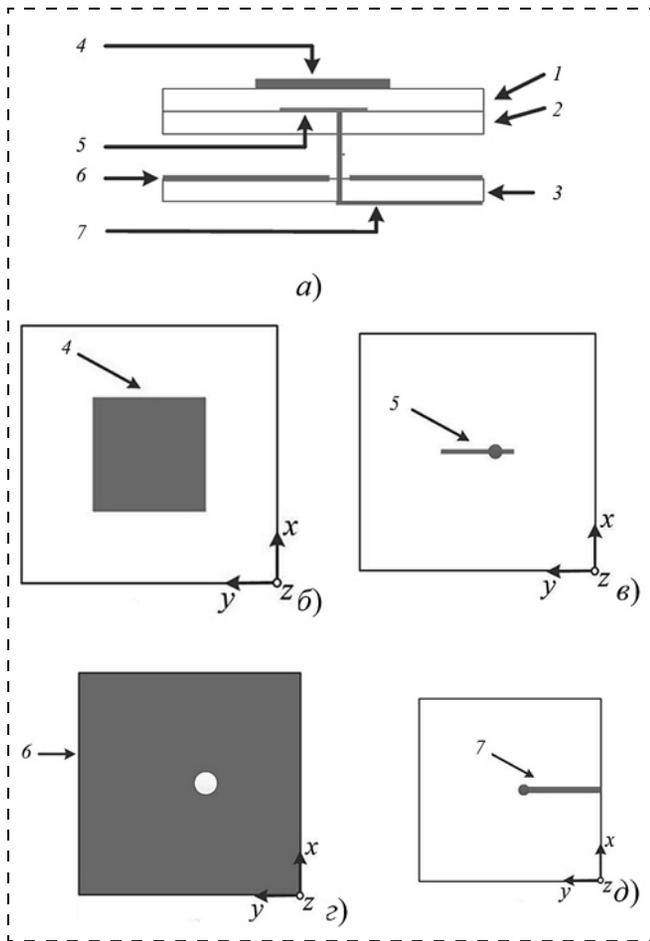


Рис. 27. Строение решетки АСА:
a — сечение; *б* — топология пассивного монополя 4; *в* — топология активного монополя 5; *г* — экранирующий проводник; *д* — нижний слой металлизации

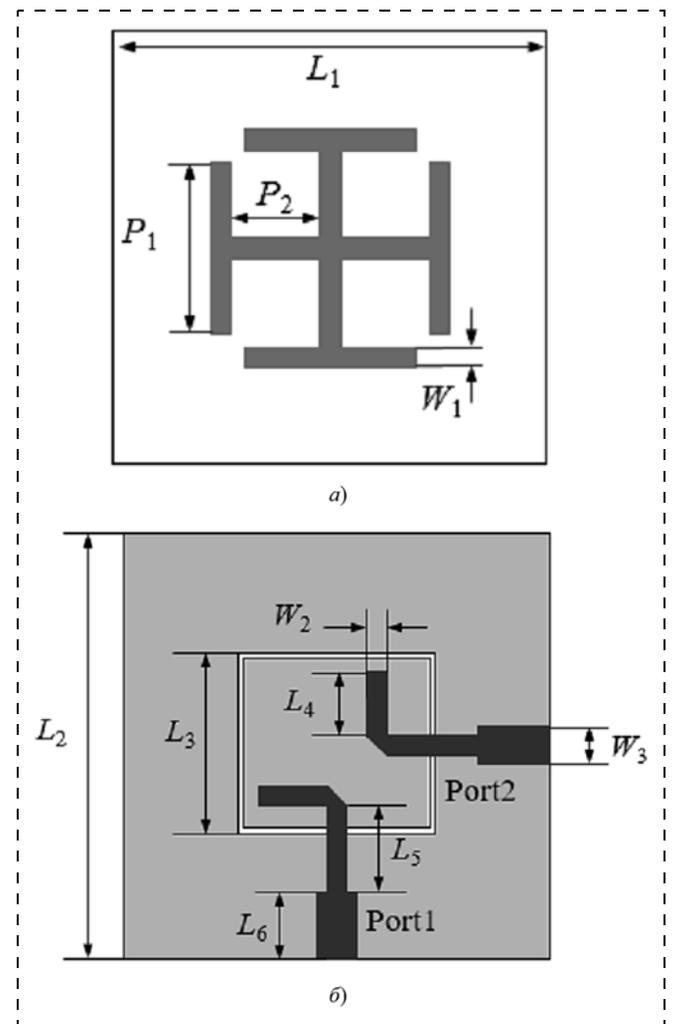


Рис. 29. Топология слоев антенны

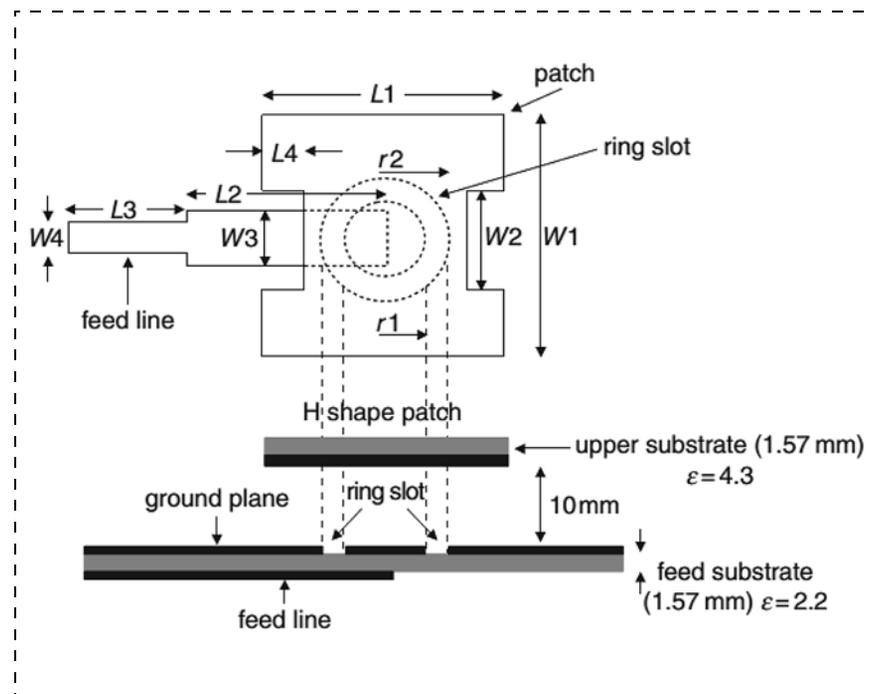


Рис. 28. Строение АСА с круговой щелью

Излучатель с емкостной связью (рис. 27) защищен в патентах [25, 26]. На рис. 27 слои 1–3 — диэлектрик; верхний пассивный монополю 4, активный монополю 5; экранирующий проводник 6; подводящая линия 7. Излучатель обеспечивает согласование и КУДН 5...6 дБи в полосе частот 24...28,5 ГГц. Указано, что решетка 4×4 имеет расстояние между излучателями менее $(0,5 \times 0,5)\lambda$.

АСА с круговой замкнутой щелью, показанная на рис. 28, имеет полосу 2,3...3,845 ГГц (54 %) при максимальном КУДН 8 дБи [27].

Излучатель-монополю может иметь крестообразную форму (рис. 29, *a*), от подводящих линий его отделяет изолированный про-

водящий прямоугольник (рис. 29, б) [28]. Получена рабочая полоса частот 3,4...3,6 ГГц при КУДН 9 дБи.

Фирма *Murata* патентом защищает чип-антенну (рис. 30) [29]. Предложено компактно размещать активные монополюсы 21 верхнего диапазона и L-образные антенны 22 нижнего диапазона.

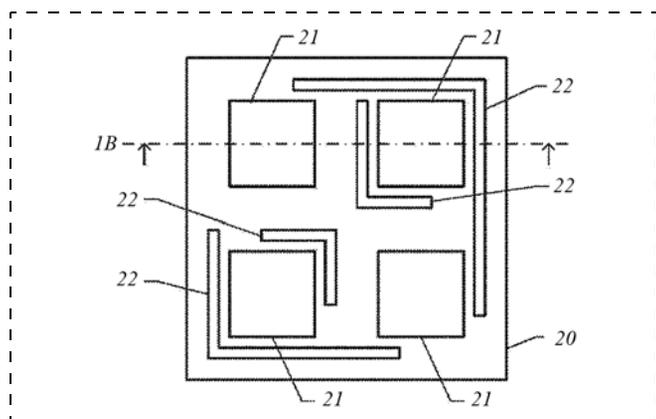


Рис. 30. Топология излучателя чип-антенны

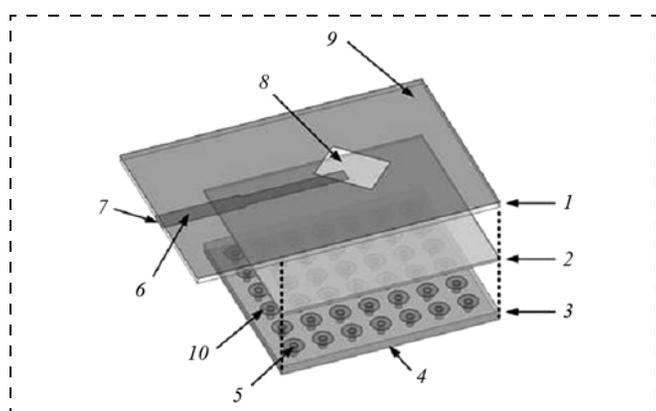


Рис. 31. Строение многослойного излучателя

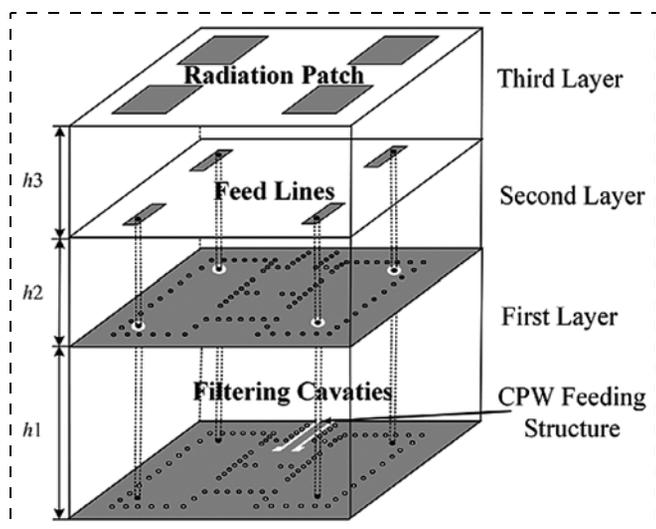


Рис. 32. Строение слоев антенны

Предложена также модификация структуры АСА без монополя с одной щелью 8 в верхнем слое металлизации 9, под которым выполнена подводящая микрополосковая линия 6 с входным портом 7, с метаструктурами 10, соединенными межслойными закоротками 5 в нижнем экранирующем слое 4 (рис. 31). Слои 1—3 — диэлектрик. Рабочая полоса составляет 24,8...31,7 ГГц [30].

Концепция многослойной антенны из 2×2 излучателей (рис. 32) реализована в излучателе Ка-диапазона размером 12×12 мм с четырьмя пассивными монополями [31]. Сигнал подводится по копланарной линии к SIW-структуре, образованной двумя нижними слоями металлизации. Получена полоса более 10 % при центральной частоте рабочего диапазона 28 ГГц и КУДН более 10 дБи.

Защищена конструкция двухслойной антенны с емкостной связью между верхним монополем и подводящей линией (рис. 33), которая, благодаря оптимизации формы монополя, обеспечивает полосу более октавы (22...60 ГГц) [32]. Однако образец данного излучателя имеет существенно неравномерную частотную зависимость КУДН (рис. 34).

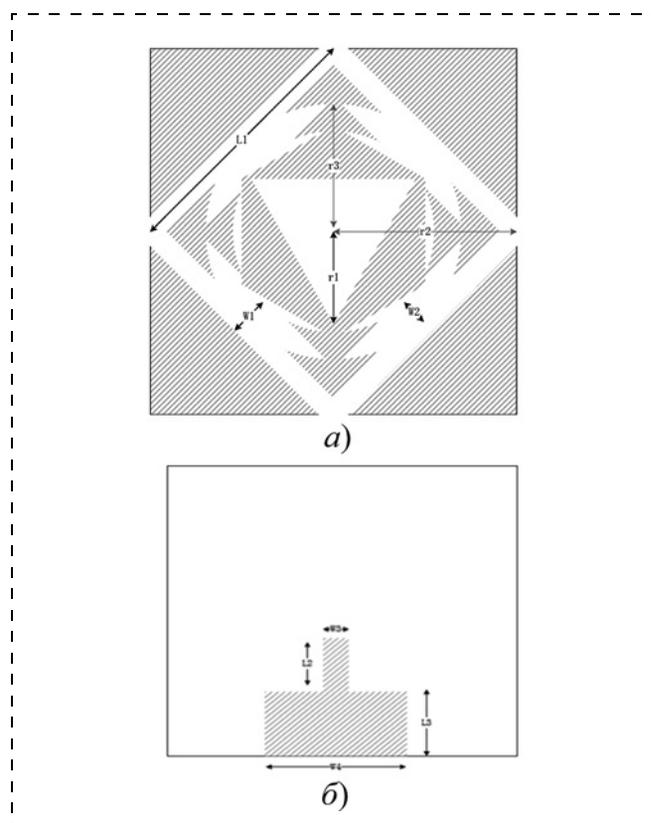


Рис. 33. Топология слоев металлизации: а — верхнего; б — нижнего

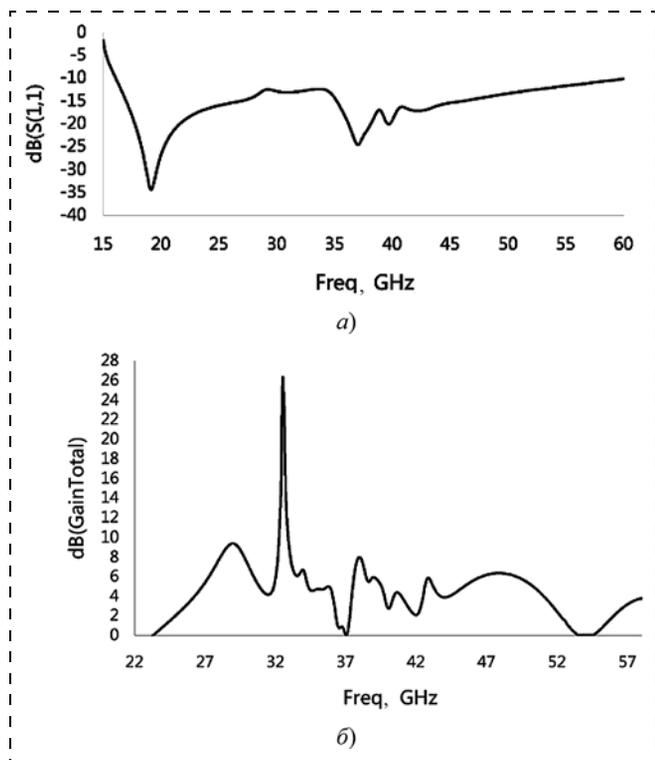


Рис. 34. Частотные зависимости:
a — коэффициента отражения; *б* — КУДН

Антенна с двумя слоями металлизации с подводящей копланарной линией (рис. 35) отнесена к АСА [33]. Реализованный образец показал рабочую полосу 8...12,5 ГГц (40 %).

Разрезание верхнего монополя на девять частей, введение продольных шлейфов щели при копланарной подводящей линии, как показано на рис. 36, расширило полосу излучателя до 67 % (~ 4,9...9,7 ГГц) [34].

АСА позволяет без увеличения площади реализовать круговую поляризацию излучения, для

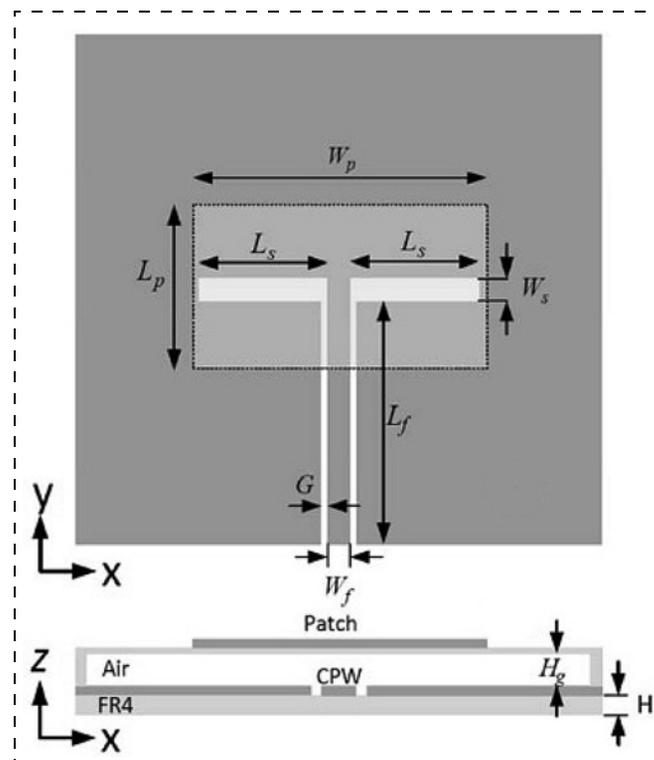


Рис. 35. АСА с копланарной подводящей линией

этого достаточно ввести вторую ортогональную щель под монополем или под ДР. Круговая поляризация может быть обеспечена также оптимизацией формы микрополосковой линии и щели, что имеет место в АСА, показанной на рис. 1.

На ортогональные щели необходимо подавать сигналы со сдвигом 90°. Формирователь сигнала с фазовым сдвигом 90° может быть реализован как делитель с четвертьволновым шлейфом, показанным на рис. 37, или как квадратурный мост [35]. АР размером 4×4 из данных излучателей имеет

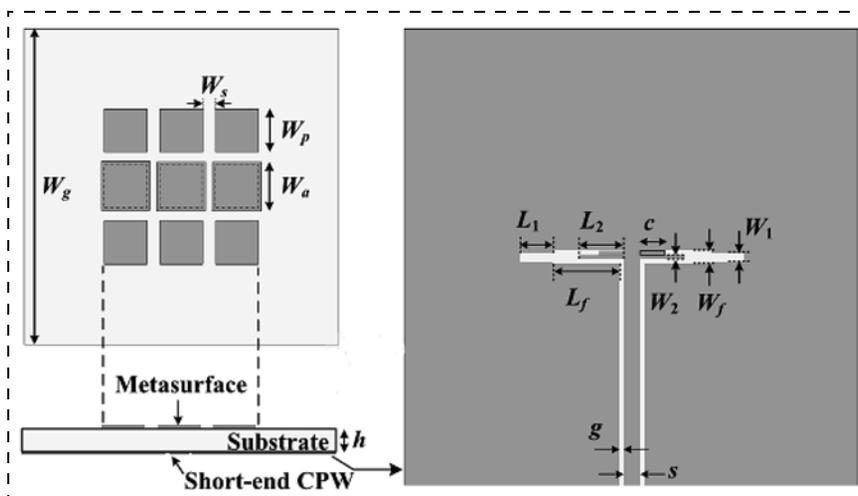


Рис. 36. АСА с копланарной подводящей линией с разрезанным монополем

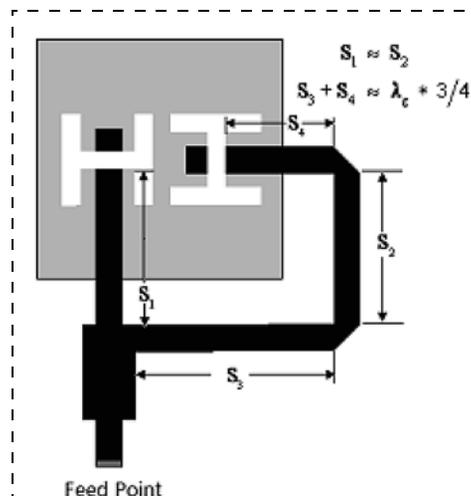


Рис. 37. Строение АСА с делителем

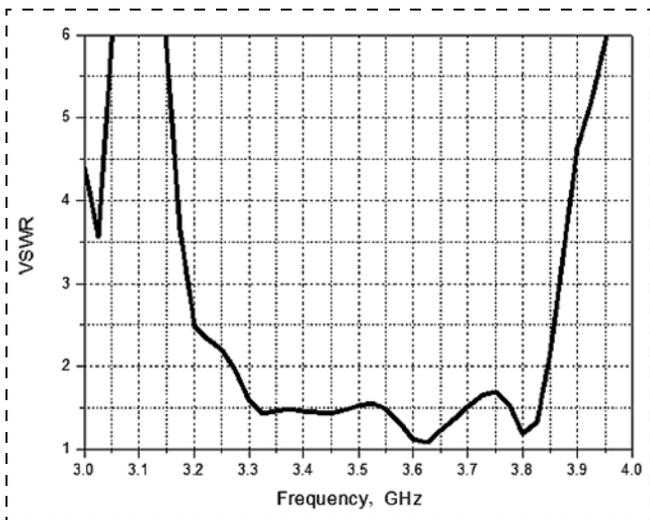


Рис. 38. АЧХ АР

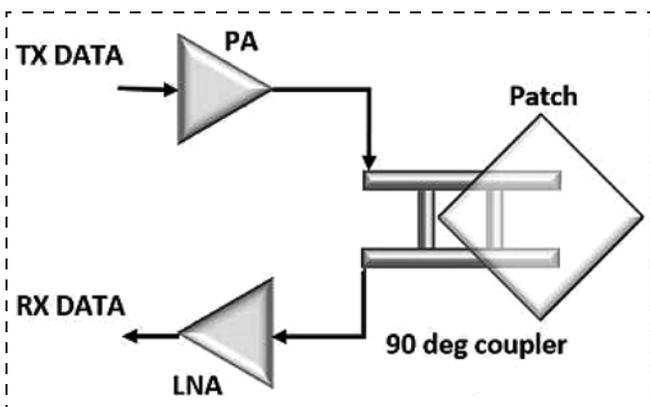


Рис. 39. Схема развязки передающего и приемного трактов

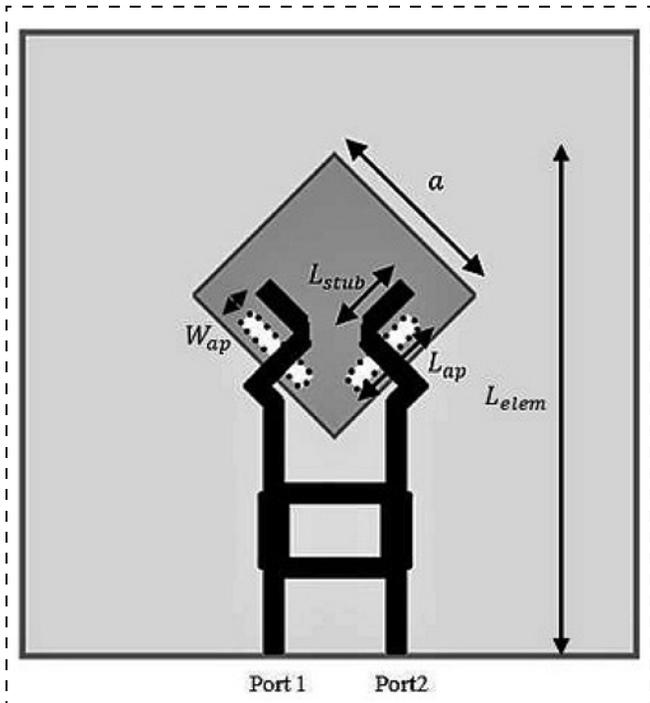


Рис. 40. Реализация развязки приемного и передающего трактов квадратным мостом

широкополосное согласование входа за счет оптимизации фрагментов топологии (рис. 38).

АСА с круговой поляризацией открывают возможность развязки передающего и приемного трактов использованием квадратурного моста (рис. 39) [36]. Для АСА с квадратным мостом (рис. 40) получена развязка 20 дБ в узкой полосе 25 МГц на частоте 5,5 ГГц.

Примером АСА с мостовой развязкой является структура, приведенная на рис. 41, а (см. третью сторону обложки) [37]. Получено узкополосное согласование в S-диапазоне при развязке не более 27 дБ (рис. 41, б).

Защищена компоновка АСА с круговой поляризацией, обеспечивающая рабочие полосы частот 23,67...30 и 36,78...40,58 ГГц [38]. Общий вид антенны показан на рис. 42. Над щелями 221 и 223 расположены монополи 231 и 233 в двух слоях.

Рабочая полоса 30 % от центральной частоты 5,8 ГГц получена для АСА с неодинаковыми щелями при коэффициенте связи подводящих линий менее -24 дБ (рис. 43) [39].

ФАР W-диапазона из апертурно-связанных излучателей с двойной поляризацией (рис. 44), реализованная на отдельном чипе, описана в патенте [40]. Топологии щелей и подводящих линий 502, 504 выполнены различными.

Моделированием исследованы излучатель ФАР с круговой поляризацией на основе АСА

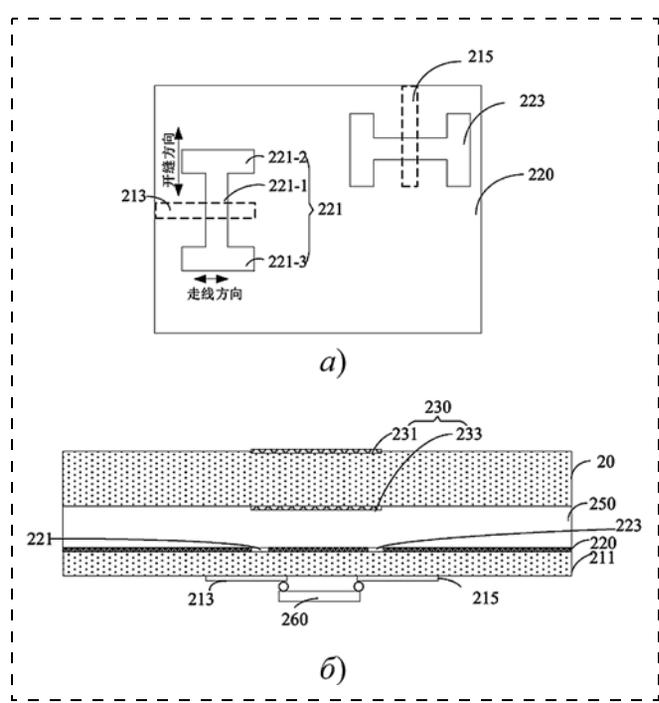


Рис. 42. АСА:
а — топология; б — сечение

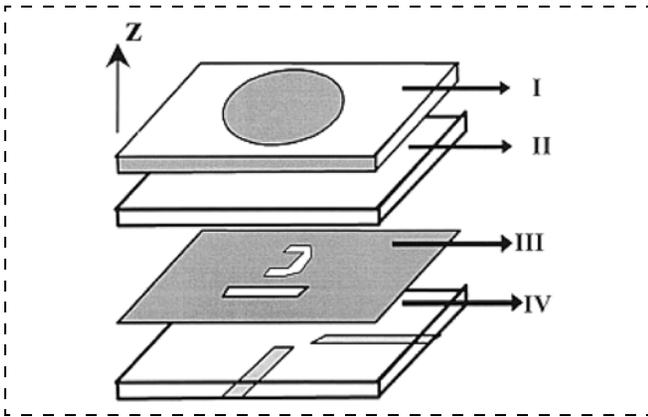


Рис. 43. Структура АСА с неравными щелями

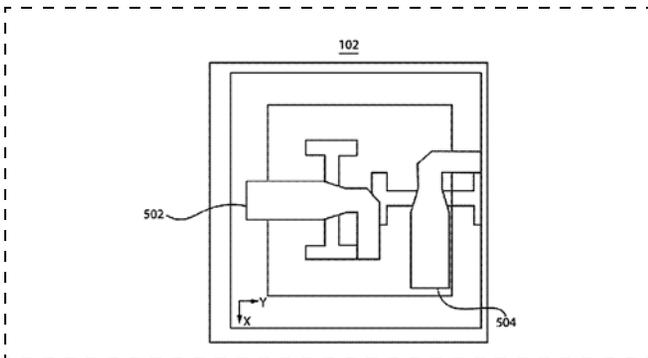


Рис. 44. Топология излучателя ФАР с двойной поляризацией

(рис. 45, а) и на основе емкостной связи монополя (рис. 45, б) [41]. Оба варианта имеют близкие рабочие полосы в Ка-диапазоне при размерах $0,51 \times 0,51\lambda$ (λ — длина волны для 30 ГГц).

Предложены варианты АСА с круговой поляризацией [42]. Рис. 46, а показывает вариант с подводящей микрополосковой линией 140, рис. 46, б, в показывают строение антенны при подводящей щелевой линии 140, что требует только двух слоев металлизации. Для антенны, показанной на рис. 46, б, получена полоса частот 2,15...2,85 ГГц.

В АСА с круговой поляризацией, представленной на рис. 47, возбуждение четырех излучателей происходит от четырех портов 340. При подаче на каждый порт сигналов от отдельного усилителя мощности отпадает необходимость в блоке суммирования мощности этих усилителей [43]. Описана также решетка из таких излучателей.

Описана конструкция антенного модуля, реализующего АСА вида, показанного на рис. 48 [44]. Его особенностями является второй проводящий слой 104 с крестообразной щелью 126 и создание межслойных закороток 124 под слоем металлизации 108 со щелями 116-1. Подводящий фидер расположен под щелями 116-1 и 116-2.

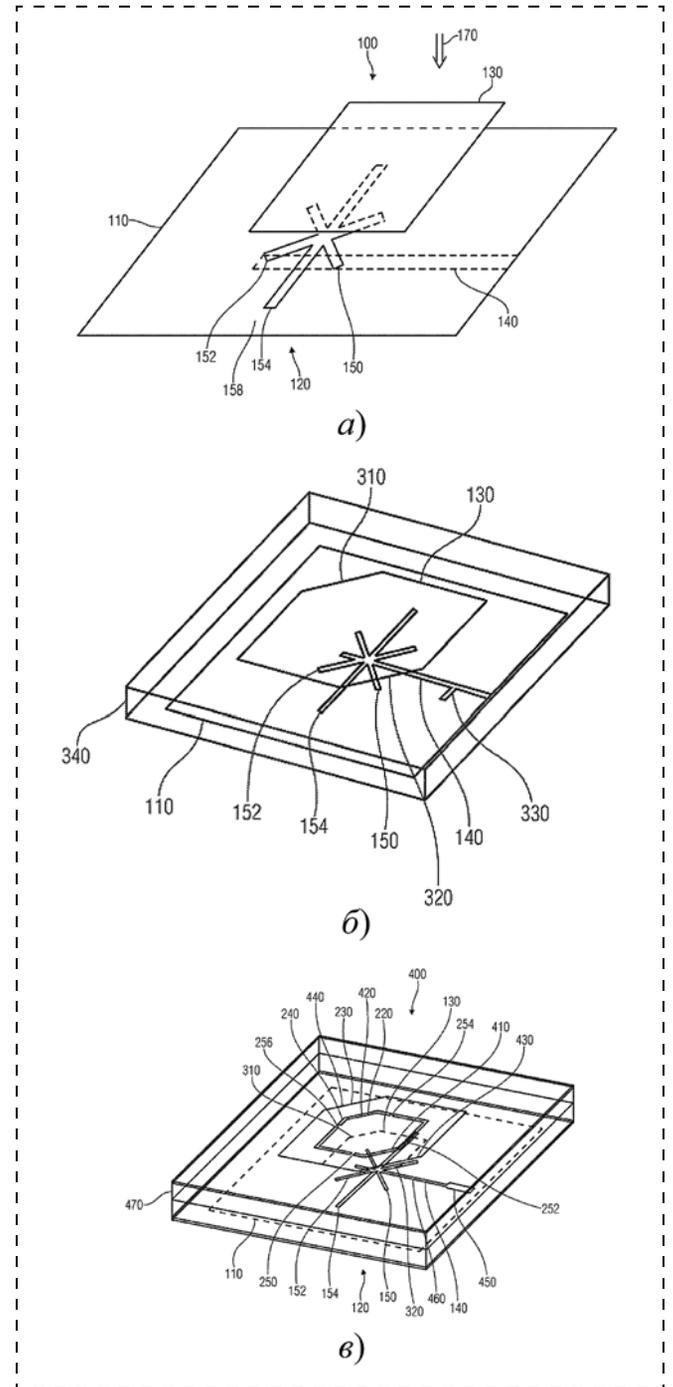


Рис. 46. Варианты АСА:

а — с подводящей микрополосковой линией; б, в — с подводящей щелевой линией

Для АСА, имеющей крестовую щель 9 и пересекающиеся подводящие линии 7 и 8 (рис. 49) получена сравнительно узкая полоса частот примерно 8,2...9,0 ГГц [45]. Подводящие микрополосковые линии 7 и 8 выполнены в различных слоях; 9 — щель в слое металлизации 3; 1, 2 — диэлектрик; 4—6 — пассивные монополи верхнего слоя.

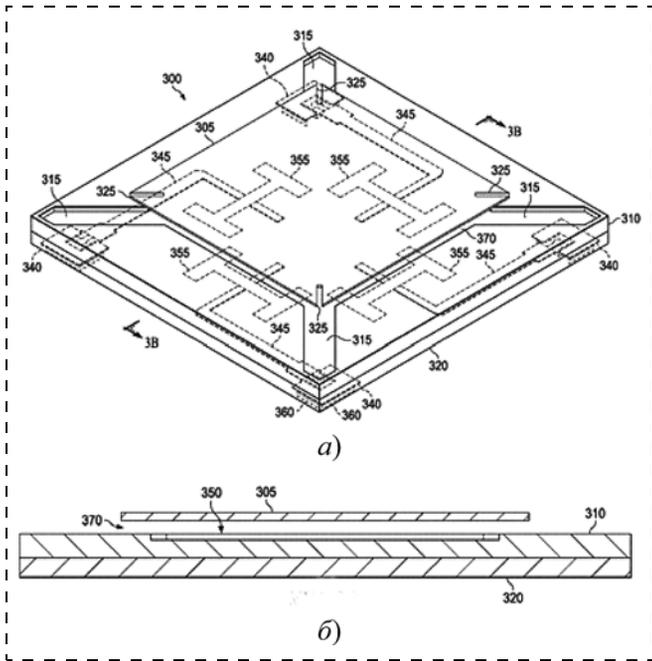


Рис. 47. АСА:
а — общий вид; б — сечение

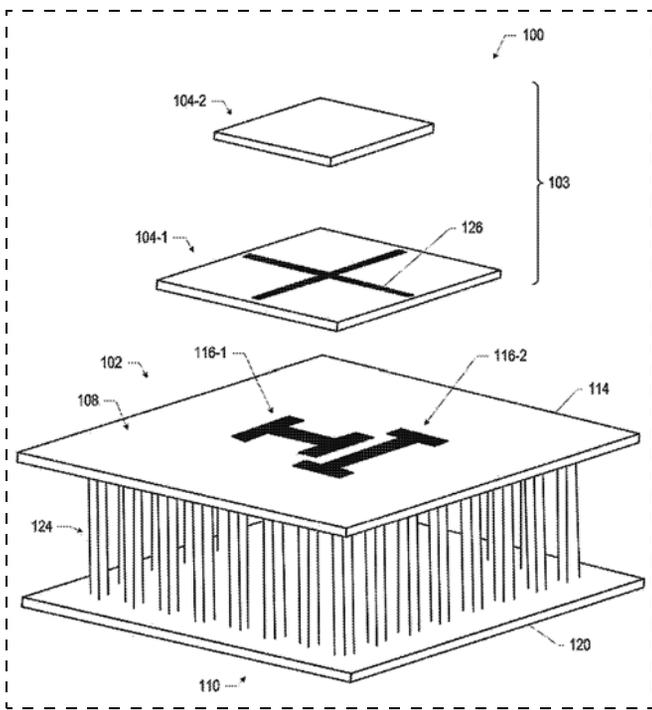


Рис. 48. Строение АСА

Вариант топологии АСА с круговой поляризацией защищен в патенте [46]. В нижнем слое находятся подводящие линии 8 и 9 обеих поляризаций, в экранирующем слое — четыре щели (рис. 50, а), верхний слой выполнен из различных вариантов отдельных пассивных монополей (рис. 50, б). На важность оптимизации тополо-

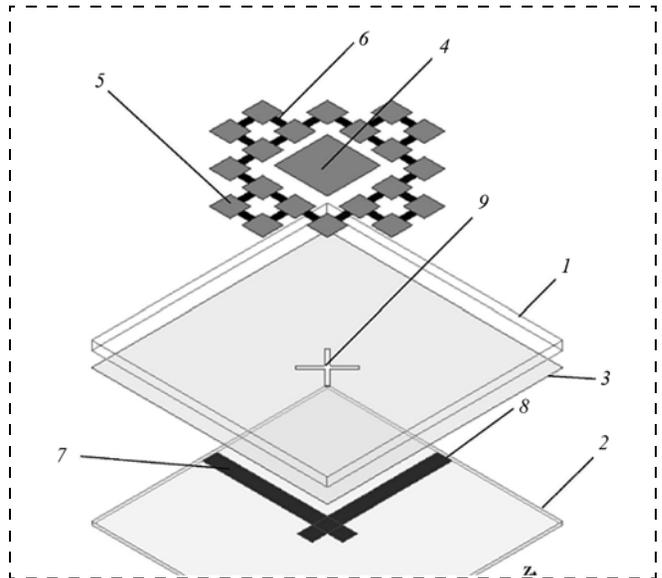


Рис. 49. Строение АСА

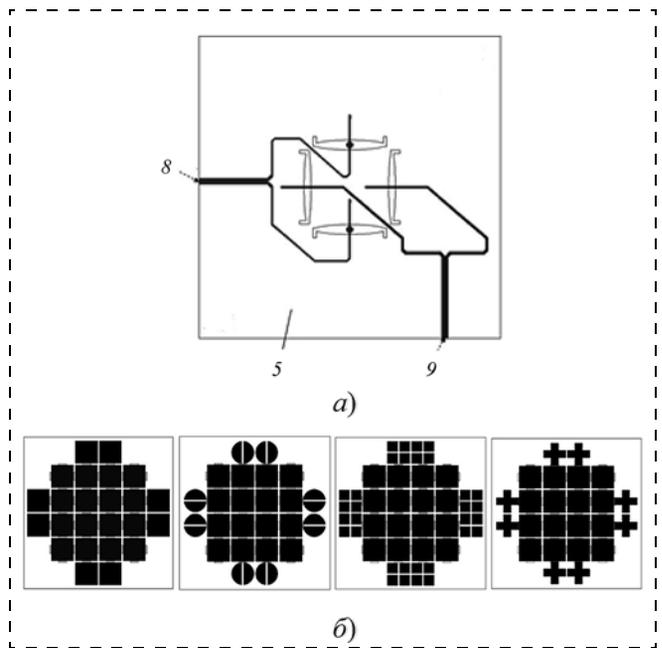


Рис. 50. Топологии слоев АСА:
а — нижнего и среднего; б — варианты верхнего

гии пассивных монополей указывает сравнение характеристик, приведенных на рис. 51.

АСА с тремя уровнями щелей 21, 31 и 41 (рис. 52) описана в патенте [47]. Частотная зависимость отраженных сигналов и развязка входов показана на рис. 53. КУДН превышает 12 дБи в рабочей полосе частот 24,75...27,5 ГГц. Развязка входов в данной полосе более 43 дБ.

Четырехслойная антенна (рис. 54) обеспечивает полосу 24,3...28,3 ГГц при двойной поляризации [48]. Ее особенностью является использо-

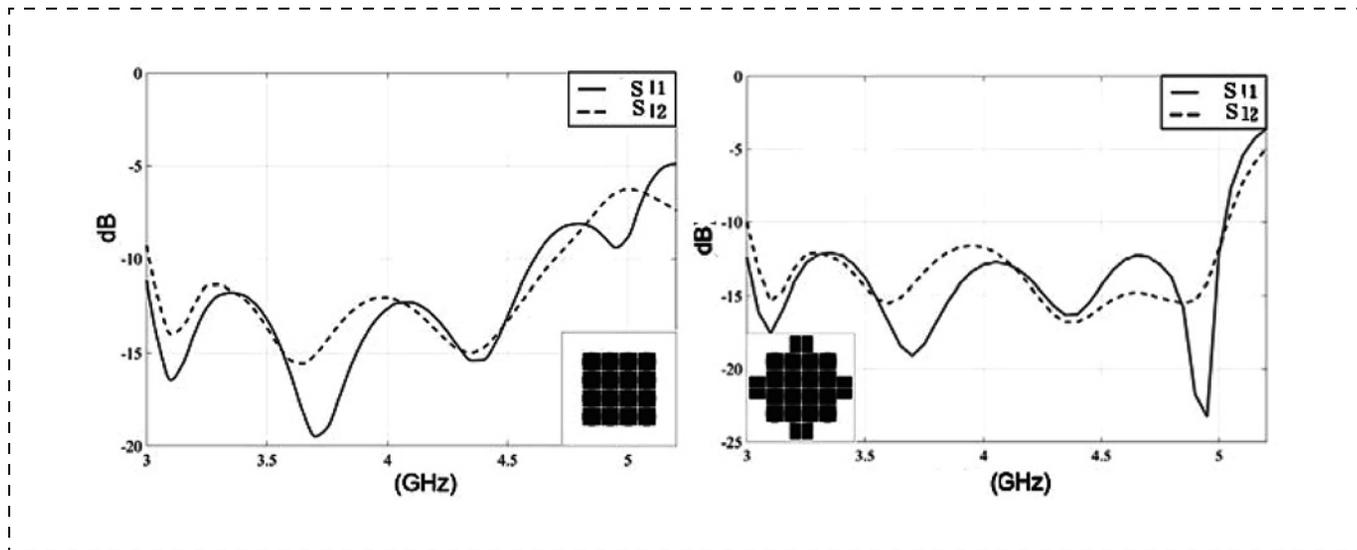


Рис. 51. Характеристики АСА для различных вариантов излучателей

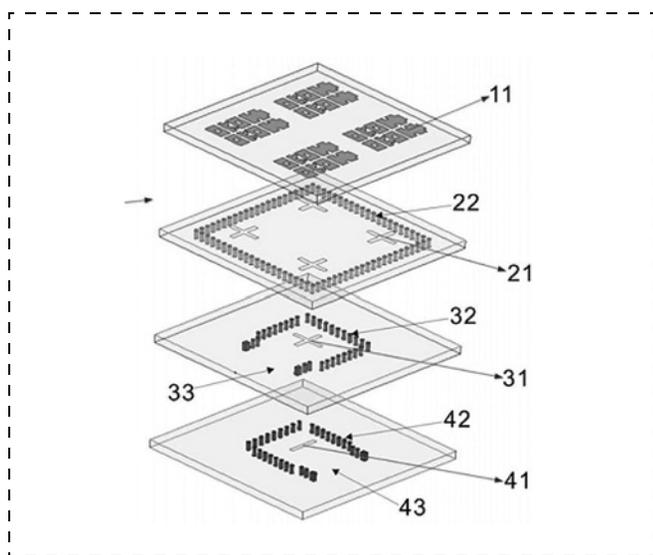


Рис. 52. Строение многослойного излучателя

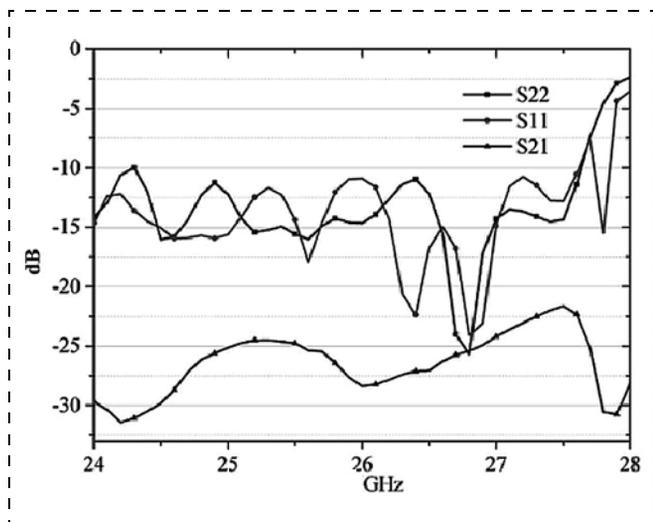


Рис. 53. АЧХ излучателя

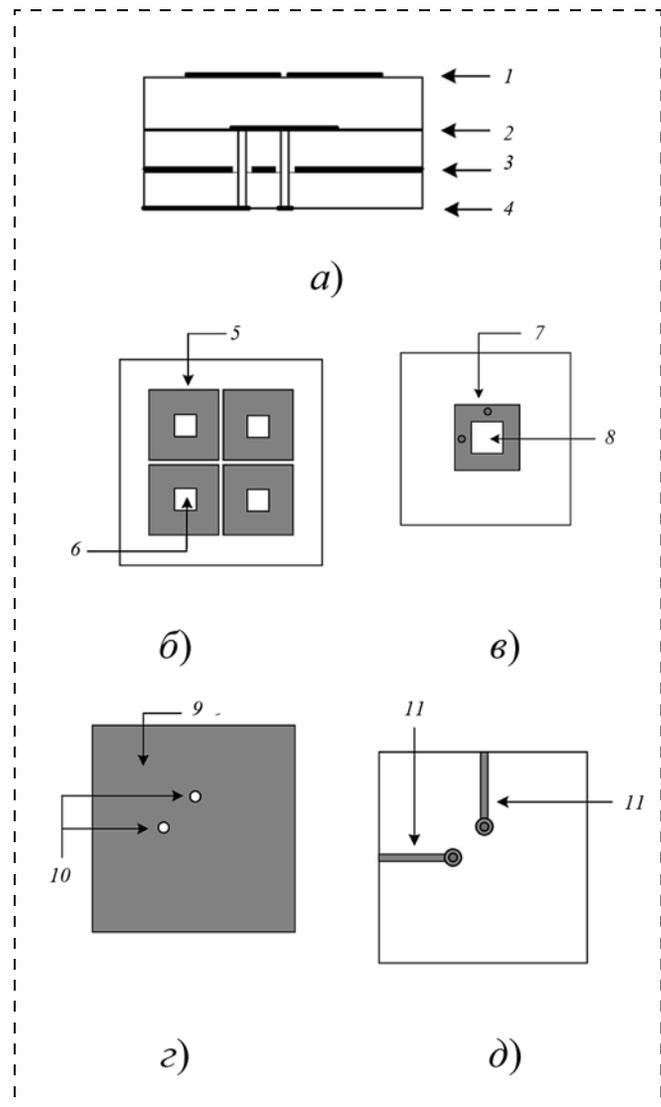


Рис. 54. Антенна:

a — сечение (1–4 — проводящие слои); *б* — слой 1; *в* — слой 2; *г* — слой 3; *д* — слой 4

вание четырех пассивных монополей 5 с окнами металлизации 6, возбуждаемых активным монополем 7 (с окном металлизации 8) емкостной связью, сигналы на монополь 7 поступают через два межслойных соединителя от двух подводящих линий 11 через отверстие 10 в проводящем слое 9. Оптимальный выбор координат соединителей обеспечивает практически совпадающие характеристики S11 и S22 подводящих линий и КУДН более 10 дБи в рабочей полосе частот 24,3...28,3 ГГц.

Предложена АСА, в которой круговая поляризация достигается при одной щели путем оптимизации формы монополя и разделения его на части, соединения частей с экранирующим проводником (рис. 55, см. четвертую сторону обложки). Рабочая полоса частот достигает 38...50 ГГц (рис. 56). Решетка 4×4 излучателей показала КУДН более 16 дБи [49].

Многослойный излучатель (рис. 57) с площадью не более площади монополя позволяет обеспечить полосу 3,16...4,1 ГГц по уровню КСВ < 1,5 при КУДН около 7,2 дБи [50]. Излучатель имеет шесть слоев: нижний слой образует подводящую линию и делитель с шлейфами согласования. Второй снизу слой — экран, через отверстия в котором два сигнала с делителя поступают через межслойные соединения на скрещивающиеся шлейфы (третий и четвертый снизу слои металлизации), выше находятся два пассивных монополя (см. рис. 25, з, д). Размер излучателя — 50 × 50 мм.

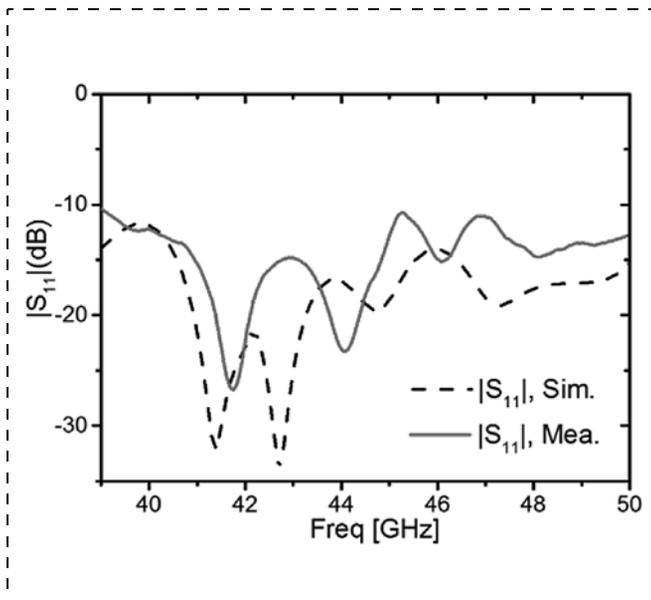


Рис. 56. АЧХ излучателя

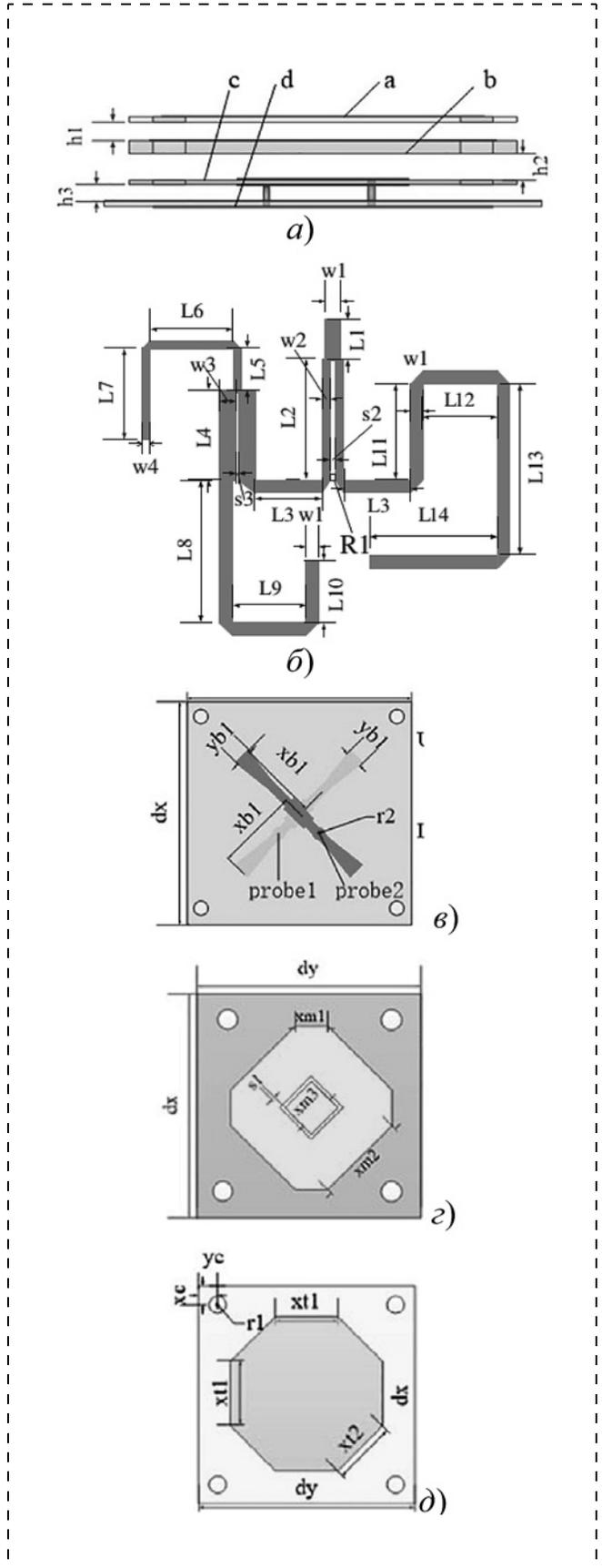


Рис. 57. Сечение излучателя (а); топология нижнего слоя (б); топология третьего и четвертого слоев металлизации (в); нижний пассивный монополь (з); верхний пассивный монополь (д)

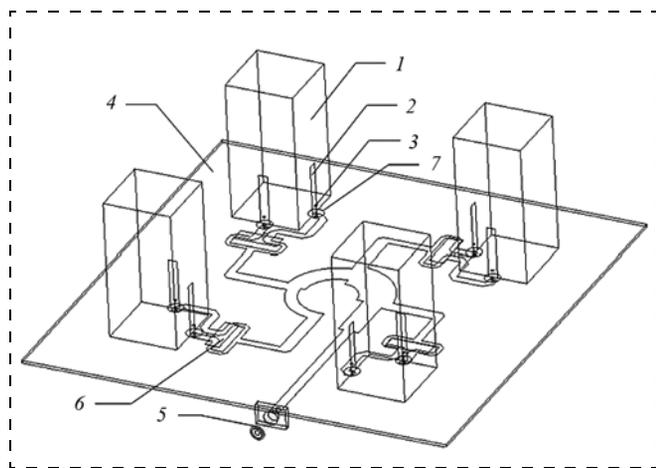


Рис. 58. Строение излучателя с ДР:

1 — прямоугольник из диэлектрика; 2 — возбуждающая линия; 3 — переход; 4 — экранирующий проводящий слой; 5 — входной порт; 6 — проводящая микрополосковая линия с делителями; 7 — отверстие в экранирующем слое 4

Излучатель с четырьмя прямоугольниками 1 из диэлектрика (рис. 58) обеспечивает рабочую полосу частот 2,37...4,34 ГГц [51].

Заключение

Апертурно- и емкостно-связанные антенны имеют компактные размеры, планарное строение, обеспечивают широкую рабочую полосу частот, круговую поляризацию, что привлекает усилия разработчиков для создания новых разновидностей данных антенн. Большое число изменяемых размеров топологии открывает широкие возможности для оптимизации характеристик. Эти соображения делают АСА востребованными в составе компактных интегрированных приемопередающих модулей.

Список литературы

1. Лисицкий А. П., Мальцев П. П., Матвеев О. С., Михалев А. О., Трофимов А. А., Скрынский В. Р. Тенденции развития планарных излучающих систем миллиметрового диапазона длин волн. Монополи и диполи. Обзор // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23, № 2. С. 88—112.
2. Hussam A. S., Mohammad F., Abdel-Wahab W. M., Rafi G., Safavi-Naeini S. A 4X4 Circularly Polarized Aperture Coupled Antenna Array for Ka-Band Satellite Communication. 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. 19—24 July, 2015. P. 1896—1897.
3. Kaushal S., Yamamoto R., Kobayashi K., Guan N. A Millimeter-Wave Aperture Coupled High-Gain Antenna Array, 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). 1—4 Aug., 2018. P. 930—934.
4. Патент Китая CN104037497B, МПК H01Q 001/38, H01Q 001/50, H01Q 021/00, H01Q 023/00. The Ku-wave band

transmitting-receiving multilayered printed antenna of Shared aperture / Liu Jinsong, Wang Hua, Yin Zhiping, Cai Qinggang, Cha Fang, Fu Yong; заявитель и патентообладатель Anhui East China Optoelectronic Technology Institute. — CN201410198903.5A; заявл. 2014-05-13; опубл. 2016-08-17.

5. Aşci Y., Pehlivan M., Yeğin K. Wideband, high gain aperture coupled Ku-band antenna for SatCom, 2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR). 22—23 Nov. 2016. P. 1—3.

6. Патент Китая CN110165400A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-015/00. Integral substrate gap waveguide feed gaps couple super surface linear polarized antenna / Shen Dongya, Chzhou Yankhao, Yuan Khun; заявитель и патентообладатель Yunnan university. — CN201910485878.1A; заявл. 2019-06-05; опубл. 2019-08-23.

7. Патент Китая CN108717996. МПК H01Q1/38, H01Q1/48, H01Q1/50, H01Q19/17. Broadband circularly-polarized antenna for handheld through-wall radar / Xu Xianwu; Tang Shiwen; Xu Wenquan; Chen Jialei; Zhu Yiqiao; заявитель и патентообладатель Hunan Saibo Electronic Technology Co., Ltd. — CN201810513396.8A; заявл. 2018-05-25; опубл. 2019-07-23.

8. Hsu C.-C., Liu N.-C., Wu S.-J., Tarng J.-H. An Ultra-Wideband Millimeter Wave Aperture-coupled Patch Antenna Using a Comb-shaped Metasurface, 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). 10—13 Dec. 2019. P. 658—660.

9. Патент Китая CN110459864A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-015/00. A kind of super surface broad-band antenna based on dielectric patch / SHI JIN, WU HAO, CHEN YANYUN, XU KAI, WANG LEI, YANG YONGJIE?; заявитель NANTONG UNIVERSITY, патентообладатель NANTONG XIANJIN COMMUNICATION TECH RES INSTITUTE. — CN201910581992.4A; заявл. 2019-06-30; опубл. 2019-11-15.

10. Патент Китая CN109818145A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-021/24, H01Q-021/22. A kind of the fluting circular patch antenna and array of vertical folding / Hong Wei, Xu Jun, Jiang Zhihao, Zhang Hui; заявитель и патентообладатель Southeast University. — CN201910215925.0A; заявл. 2019-03-21; опубл. 2019-05-28.

11. Zhu Q., Ng K. B., Chan C. H., Luk K.-M. Substrate-Integrated-Waveguide-Fed Array Antenna Covering 57—71 GHz Band for 5G Applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017. Vol. 65, N. 12. P. 6298—6306.

12. Miao Z.-W., Hao Z.-C., Luo G. Q., Gao L., Wang J., Wang X., Hong W. 140 GHz High-Gain LTCC-Integrated Transmit-Array Antenna Using a Wideband SIW Aperture-Coupling Phase Delay Structure // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66, N. 1. P. 182—190.

13. Gupta S., Akbari M., Movahedinia R., Zarbakhsh S., Sebak A. R. Low-Side Lobe Level Aperture Coupled Dielectric Resonator Antenna Array Fed by SIW, 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 10—15 April, 2016. P. 1—4.

14. Warad M., Sharma A., Prasad C. S., Biswas A. A High Gain Aperture Coupled Cylindrical Dielectric Resonator Antenna with Metamaterial Superstrate // 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), 26 June—1 July, 2016. P. 133—134.

15. Zebiri C.-E., Lashab M., Sayad D., Elfergani I. T. E., Sayidmarie K. H., Benabdelaziz F., Abd-Alhameed R. A., Rodriguez J., Noras J. M. Offset Aperture-Coupled Double-Cylinder Dielectric Resonator Antenna With Extended Wideband // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017. Vol. 65, N. 10. P. 5617—5622.

16. Zebiri C., Sayad D., Elfergani I. T. E., Kosha J. S., Mshwat W. F. A., See C. H., Lashab M., Rodriguez J., Sayidmarie K. H., Obeidat H. A., Abd-Alhameed R. A. Antenna for Ultra-Wideband Applications With Non-Uniform Defected Ground Plane and Offset Aperture-Coupled Cylindrical Dielectric Resonators // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 166776—166787.

17. Abdel-Wahab W. M., Wang Y., Al-Saedi H., Safavi-Naeini. Miniaturized SIW-integrated 2D DRA array for 5G MMW applications // Microwave and Optical Technology Letters. 2016. Vol. 58, N. 12. P. 2804—2807.

18. **Park S.-J., Park S.-O.** LHCP and RHCP Substrate-Integrated-Waveguide Antenna Arrays for Millimeter-Wave Applications // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2016. Vol. 16. P. 601–604.
19. **Xiong H., Qian Z., Wang H.** Broadband High-Gain Aperture-Coupled Patch Antenna Array Based on SIW for 60 GHz Applications // *2020 IEEE 3rd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*. 13–15 Nov. 2020. P. 362–364.
20. **Патент** Китая CN110544822A, МПК H01P-001/203, H01P-001/208, H01Q-001/38, H01Q-015/00. Ka-band miniaturized filtering antenna based on SIW structure / DONG GANG, YANG YINTANG; заявитель и патентообладатель XIDIAN UNIVERSITY. — CN201910619752.9A; заявл. 2019-07-10; опубл. 2019-12-06.
21. **Mohamed I., Sebak A.** Aperture-Coupled 2×2 Microstrip Antenna Array for 60 GHz Applications // *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 19–24 July 2015, P. 1900–1901.
22. **Diawuo H. A., Jung Y.-B.** Wideband proximity coupled microstrip linear array design for 5G mobile communication // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2017. Vol. 59, N. 12. P. 2996–3002.
23. **Honari M. M., Abdipour A., Morad G.** Aperture-coupled multi-layer broadband ring-patch antenna array // *IEICE Electronics Express*. 2012. Vol. 9, N. 4, P. 250–255.
24. **Honari M. M., Abdipour A., Moradi G., Mirzavand R., Mousavi P.** Design and Analysis of a Series-Fed Aperture-Coupled Antenna Array With Wideband and High-Efficient Characteristics // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 22655–22663.
25. **Патент** Китая CN209217196U, МПК H01Q -001/36, H01Q -001/48, H01Q -001/50, H01Q -009/04, H01Q -021/06. Low-profile broadband dielectric resonator antenna / YANG WENWEN, SHI JIN, YANG SHI; заявитель NANTONG TO SHENG MICROELECTRONICS TECHNOLOGY, патентообладатель TONGFU MICROELECTRONICS — CN201920055881.5U; заявл. 2019-01-14; опубл. 2019-08-06.
26. **Патент** Китая CN109616751A, МПК H01P-007/10, H01Q-001/36, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-009/04, H01Q-021/06. A kind of low section broadband medium resonant aerial / YANG WENWEN, SHI JIN, YANG SHI; заявитель NANTONG TO SHENG MICROELECTRONICS TECHNOLOGY, патентообладатель TONGFU MICROELECTRONICS. — CN201910032036.0A; заявл. 2019-01-14; опубл. 2019-04-12.
27. **Qin Y., Gao S., Sambell A., Korolkiewicz E., Elsdon M.** Broadband patch antenna with ring slot coupling // *Electronics Letters*. 2004. Vol. 40, N. 1. P. 5–6.
28. **Li R., Hua C., Lu Y., Wu Z., Wang Y.** Dual-polarized aperture-coupled filtering antenna // *2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition*. 30 May – 1 June 2017. P. 152–153.
29. **Патент** США US20190123441. МПК H01Q3/26, H01Q5/35, H01Q5/50. Multi-antenna module and mobile terminal / Kaoru Sudo, Yasuhisa Yamamoto, Satoshi Tanaka; заявитель и патентообладатель Murata Manufacturing Co. Ltd. — US16/038,464; заявл. 2018-07-18; опубл. 2020-01-07.
30. **Патент** Китая CN209880807U, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-001/52, H01Q-015/24. SIGW circular polarized antenna / SHEN DONGYA, ZHANG XIUPU, MA CHAOJUN, WANG YIAN, REN WENPING, FU ZEXU ?; заявитель и патентообладатель YUNNAN UNIVERSITY. — CN201920111719.0U; заявл. 2019-01-23; опубл. 2019-12-31.
31. **Zhang X., Yan J., Zhang H., Chen Y.** Compact low-temperature cofired ceramic filtering antenna array with high selectivity exploiting substrate integrated waveguide for 5G // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2019. Vol. 61, N. 9. P. 2046–2048.
32. **Патент** Китая CN109713444. МПК H01Q1/32, H01Q1/38, H01Q1/48, H01Q1/50. A kind of wideband car radar micro-strip patch antenna / LU SIWEI, DAN ZHIYONG, CHENG YUNPENG; заявитель и патентообладатель DONGHUA UNIVERSITY. — CN201910187943.2A; заявл. 2019-03-13; опубл. 2019-05-28.
33. **Kanjanasit K., Wang C.** A High Performance Micromachined CPW Fed Aperture Coupled Compact Patch Antenna Using a Double-Tuned Impedance Matching Method // *2016 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*. 24–27 Oct. 2016. P. 1–5.
34. **Wang J., Wong H., Ji Z., Wu Y.** Broadband CPW-Fed Aperture Coupled Metasurface Antenna // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2019. Vol. 18, N. 3. P. 517–520.
35. **Huo S.** Design and Simulation of a Aperture Coupled circularly polarization array antenna // *2018 IEEE International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE)*. 10–12 Dec. 2018. P. 91–95.
36. **Bouça P., Matos J. N., Cunha S. R., Carvalho N. B.** Low-Profile Aperture-Coupled Patch Antenna Array for CubeSat Applications // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 20473–20479.
37. **Ferreira F. G., Vieira J. M., Fumagalli D. P., Pereira L. S., Heckler M. V. T.** Circularly Polarized Aperture-Coupled Microstrip Antenna for Nano-Satellites // *XXXV Simposio Brasileiro de Telecomunicacoes e Processamento de SINAIS — SBRT2017*, 3–6 de setembro de 2017. P. 57–61.
38. **Патент** Китая CN110048224A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-005/28. Antenna module / Tszya Yukhu; заявитель и патентообладатель OPPO Guangdong Mobile Communications Co., Ltd. — CN201910243151.2A; заявл. 2019-03-28; опубл. 2019-07-23.
39. **Padhi S. K., Karmakar N. C., Law C. L., Aditya S.** A dual polarized aperture coupled circular patch antenna using a C-shaped coupling slot // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2003. Vol. 51, N. 12. P. 3295–3298.
40. **Патент** США US9537224B2, МПК H01Q 021/06, H01Q 023/00, H04B 007/04. Phased-array transceiver / Daniel J. Friedman, Xiaoxiong Gu, Duixian Liu, Arun S. Natarajan, Scott K. Reynolds, Alberto Valdes Garcia; заявитель и патентообладатель International Business Machines Corp. — US14/725,161; заявл. 2015-05-29; опубл. 2017-01-03.
41. **Luo Q., Gao S., Chaloun T., Menzel W., Boccia L., Arneri E., Amendola G., Ziegler V.** Antenna Array Elements for Ka-band Satellite Communication on the Move // *2013 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, P. 135–139.
42. **Патент** США US7589676B2. МПК H01Q I/38. Aperture-coupled antenna / Alexander Popugaev, Rainer Wansch; заявитель и патентообладатель Fraunhofer Gesellschaft zur Forderung der Angewandten Forschung eV. — US11/844,520; заявл. 2007-08-24; опубл. 2009-09-15.
43. **Патент** США US20190260115A1, МПК H01Q-001/24, H01Q-021/06, H01Q-009/04, H01Q-021/00. High gain and large bandwidth antenna incorporating a built-in differential feeding scheme / Hamid Reza Memar Zadeh Tehran, Gary Xu, Won Suk Choi; заявитель и патентообладатель Samsung Electronics Co. Ltd. — US16/275,215; заявл. 2019-02-13; опубл. 2019-08-22.
44. **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.
45. **Патент** Китая CN11061161A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-003/24, H01Q-015/24. Parameter mixing reconfigurable antenna / ZHAO JIANHAO, LI MING, TAO QINGZHANG, LIANG ZHIHENG; заявитель и патентообладатель TSINGHUA UNIVERSITY. — CN201910872001.8A; заявл. 2019-09-16; опубл. 2019-12-24.
46. **Патент** Китая CN110534883A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-001/52, H01Q-015/24, H01Q-021/00, H01Q-021/06. Using the broadband low section dual polarized antenna of Based on Dual-Aperture coupling excitation / AN WENXING, MA KAIXUE, LUO YU; заявитель и патентообладатель TIANJIN UNIVERSITY. — CN201910643724.0A; заявл. 2019-07-17; опубл. 2019-12-03.
47. **Патент** Китая CN110518351A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-021/06, H01Q-021/22. A kind of dual polarization millimeter wave antenna unit and aerial array / FENG BOTAO, CHEN JUNLONG; заявитель и патентообладатель

SHENZHEN UNIVERSITY. — CN201910877217.3A; заявл. 2019-09-17; опубл. 2019-11-29.

48. **Патент** Китая CN109830802. МПК H01Q1/38, H01Q1/48, H01Q1/50, H01Q9/04. A kind of millimeter wave dual-polarized patch antenna / Shi Jin, Yin Zhiwei, Yang Shi; заявитель и патентообладатель Nantong Zhisheng Microelectronics Technology Co., Ltd. — CN201810513396.8A; заявл. 2019-01-08; опубл. 2019-05-31.

49. **Gan Z., Tu Z.-H., Xie Z.-M., Chu Q.-X., Yao Y.** Compact Wideband Circularly Polarized Microstrip Antenna Array for 45 GHz Application, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, Vol. 66, N. 11. P. 6388–6392.

50. **Wei Z., Zhai H., Ma S., Yang D., Xue K.** A low-profile broadband circular polarization filtering Antenna // Microwave and Optical Technology Letters. 2018. Vol. 60, N. 12. P. 3029–3033.

51. **Патент** Китая CN110350307A, МПК H01Q-001/36, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-015/24, H01Q-021/00, H01Q-021/06. A sequential phase-fed circularly polarized dielectric resonant antenna array / JIANG ZHAONENG, ZHAO XIAOYAN, ZHAO HONGZHI, HUANG SHICHUN, XUAN XIAOFENG, HUANG YING, JI FANGZHENG, WANG ZHIXIN?; заявитель и патентообладатель HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. — CN201910630139.7A; заявл. 2019-07-12; опубл. 2019-10-18.

A. P. Lisitsky¹, Ph. D., Leading Researcher, RAS, 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^{1, 2}, Junior Researcher, m2lkeny@yandex.ru,

A. A. Trofimov¹, Ph. D., Senior Researcher, aa-trofimov@yandex.ru,

V. R. Skrinsky², Assistant, vlad_ckr@mail.ru

¹ V. G. Mokerov Institute of ultra high frequency semiconductor of Russian academy of sciences, 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., Senior Researcher, G. Mokerov Institute of ultra high frequency semiconductor of Russian academy of sciences, Moscow 117105, Russian Federation
E-mail: liant222@yandex.ru

Development of Aperture and Capacitively Coupled Antennas. Review

Received on June 04, 2021

Accepted on June 11, 2021

Described are examples of realization and patented varieties of aperture-coupled antennas.

Keywords: antenna, aperture coupled antenna, proximity coupled antenna, capacitively coupled antenna

For citation:

Lisitsky A. P., Maltsev P. P., Matveenko O. S., Mikhalev A. O., Trofimov A. A., Skrinsky V. R. Development of Aperture and Capacitively Coupled Antennas. Review, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 201–220.

doi: 10.17587/nmst.23.201-220

References

1. **Lisitsky A. P., Maltsev P. P., Matveenko O. S., Mikhalev A. O., Trofimov A. A., Skrinsky V. R.** Trends in the Development of Planar Radiating Systems in the Millimeter Wavelength Range. Monopoles and Dipoles. Review, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 88–112 (in Russian).

2. **Hussam A. S., Mohammad F., Abdel-Wahab W. M., Rafi G., Safavi-Naeini S.** A 4X4 Circularly Polarized Aperture Coupled Antenna Array for Ka-Band Satellite Communication. *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 19–24 July 2015, pp. 1896–1897.

3. **Kaushal S., Yamamoto R., Kobayashi K., Guan N.** A Millimeter-Wave Aperture Coupled High-Gain Antenna Array,

2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), 1–4 Aug. 2018, pp. 930–934.

4. **China Patent** CN104037497B, МПК H01Q 001/38, H01Q 001/50, H01Q 021/00, H01Q 023/00. The Ku- wave band transmitting-receiving multilayered printed antenna of Shared aperture? / Liu Jinsong, Wang Hua, Yin Zhiping, Cai Qinggang, Cha Fang, Fu Yong; applicant and patent holder Anhui East China Optoelectronic Technology Institute. — CN201410198903.5A; claimed 2014-05-13; published 2016-08-17.

5. **Aşci Y., Pehlivan M., Yeğın K.** Wideband, high gain aperture coupled Ku-band antenna for SatCom, *2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR)*, 22–23 Nov. 2016, pp. 1–3.

6. **China Patent** CN110165400A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-015/00. Integral substrate gap waveguide feed gaps couple super surface linear polarized antenna / Shen Dongya, Chzhou Yankhao, Yuan Khun; applicant

and patent holder, Yunnan university. — CN201910485878.1A; claimed 2019-06-05; published 2019-08-23.

7. **China Patent** CN108717996. МПК H01Q1/38, H01Q1/48, H01Q1/50, H01Q19/17. Broadband circularly-polarized antenna for handheld through-wall radar / Xu Xianwu; Tang Shiwen; Xu Wenquan; Chen Jialei; Zhu Yiqiao; applicant and patent holder Hunan Saibo Nuoge Electronic Technology Co., Ltd. — CN201810513396.8A; claimed 2018-05-25; published 2019-07-23.

8. **Hsu C.-C., Liu N.-C., Wu S.-J., Tarng J.-H.** An Ultra-Wideband Millimeter Wave Aperture-coupled Patch Antenna Using a Comb-shaped Metasurface, *2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 10–13 Dec. 2019, pp. 658–660.

9. **China Patent** CN110459864A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-015/00. A kind of super surface broad-band antenna based on dielectric patch / SHI JIN, WU HAO, CHEN YANYUN, XU KAI, WANG LEI, YANG YONGJIE; applicant NANTONG UNIVERSITY, patent holder NANTONG XIANJIN COMMUNICATION TECH RES INSTITUTE. — CN201910581992.4A; claimed 2019-06-30; published 2019-11-15.

10. **China Patent** CN109818145A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-021/24, H01Q-021/22. A kind of the fluting circular patch antenna and array of vertical folding / Hong Wei, Xu Jun, Jiang Zhihao, Zhang Hui; applicant and patent holder Southeast University. — CN201910215925.0A; claimed 2019-03-21; published 2019-05-28.

11. **Zhu Q., Ng K. B., Chan C. H., Luk K.-M.** Substrate-Integrated-Waveguide-Fed Array Antenna Covering 57–71 GHz Band for 5G Applications, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, vol. 65, no. 12, pp. 6298–6306.

12. **Miao Z.-W., Hao Z.-C., Luo G. Q., Gao L., Wang J., Wang X., Hong W.** 140 GHz High-Gain LTCC-Integrated Transmit-Array Antenna Using a Wideband SIW Aperture-Coupling Phase Delay Structure, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no. 1, pp. 182–190.

13. **Gupta S., Akbari M., Movahedinia R., Zarbakhsh S., Sebak A. R.** Low-Side Lobe Level Aperture Coupled Dielectric Resonator Antenna Array Fed by SIW, *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 10–15 April 2016, pp. 1–4.

14. **Warad M., Sharma A., Prasad C. S., Biswas A.** A High Gain Aperture Coupled Cylindrical Dielectric Resonator Antenna with Metamaterial Superstrate, *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 26 June–1 July 2016, pp. 133–134.

15. **Zebiri C.-E., Lashab M., Sayad D., Elfergani I. T. E., Sayidmarie K. H., Benabdelaziz F., Abd-Alhameed R. A., Rodriguez J., Noras J. M.** Offset Aperture-Coupled Double-Cylinder Dielectric Resonator Antenna With Extended Wideband, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, vol. 65, no. 10, pp. 5617–5622.

16. **Zebiri C., Sayad D., Elfergani I. T. E., Kosha J. S., Mshwat W. F. A., See C. H., Lashab M., Rodriguez J., Sayidmarie K. H., Obeidat H. A., Abd-Alhameed R. A.** Antenna for Ultra-Wideband Applications With Non-Uniform Defected Ground Plane and Offset Aperture-Coupled Cylindrical Dielectric Resonators, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 166776–166787.

17. **Abdel-Wahab W. M., Wang Y., Al-Saedi H., Safavi-Naeini.** Miniaturized SIW-integrated 2D DRA array for 5G MMW applications, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2016, vol. 58, no. 12, pp. 2804–2807.

18. **Park S.-J., Park S.-O.** LHCP and RHCP Substrate-Integrated-Waveguide Antenna Arrays for Millimeter-Wave Applications, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, vol. 16, pp. 601–604.

19. **Xiong H., Qian Z., Wang H.** Broadband High-Gain Aperture-Coupled Patch Antenna Array Based on SIW for 60 GHz Applications, *2020 IEEE 3rd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*, 13–15 Nov. 2020, pp. 362–364.

20. **China Patent** CN110544822A, МПК H01P-001/203, H01P-001/208, H01Q-001/38, H01Q-015/00. Ka-band miniaturized filtering antenna based on SIW structure / DONG

GANG, YANG YINTANG; applicant and patent holder XIDIAN UNIVERSITY. — CN201910619752.9A; claimed 2019-07-10; published 2019-12-06.

21. **Mohamed I., Sebak A.** Aperture-Coupled 2x2 Microstrip Antenna Array for 60 GHz Applications, *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 19–24 July 2015, pp. 1900–1901.

22. **Diawuo H. A., Jung Y.-B.** Wideband proximity coupled microstrip linear array design for 5G mobile communication, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, vol. 59, no. 12, pp. 2996–3002.

23. **Honari M. M., Abdipour A., Morad G.** Aperture-coupled multi-layer broadband ring-patch antenna array, *IEICE Electronics Express*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 250–255.

24. **Honari M. M., Abdipour A., Moradi G., Mirzavand R., Mousavi P.** Design and Analysis of a Series-Fed Aperture-Coupled Antenna Array With Wideband and High-Efficient Characteristics, *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 22655–22663.

25. **China Patent** CN209217196U, МПК H01Q -001/36, H01Q -001/48, H01Q -001/50, H01Q -009/04, H01Q -021/06. Low-profile broadband dielectric resonator antenna / YANG WENWEN, SHI JIN, YANG SHI; applicant NANTONG TO SHENG MICROELECTRONICS TECHNOLOGY, patent holder TONGFU MICROELECTRONICS — CN201920055881.5U; claimed 2019-01-14; published 2019-08-06.

26. **China Patent** CN109616751A, МПК H01P-007/10, H01Q-001/36, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-009/04, H01Q-021/06. A kind of low section broadband medium resonant aerial / YANG WENWEN, SHI JIN, YANG SHI; applicant NANTONG TO SHENG MICROELECTRONICS TECHNOLOGY, patent holder TONGFU MICROELECTRONICS. — CN201910032036.0A; claimed 2019-01-14; published 2019-04-12.

27. **Qin Y., Gao S., Sambell A., Korolkiewicz E., Elsdon M.** Broadband patch antenna with ring slot coupling, *Electronics Letters*, 2004, Vol. 40, No. 1, pp. 5–6.

28. **Li R., Hua C., Lu Y., Wu Z., Wang Y.** Dual-polarized aperture-coupled filtering antenna, *2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition*, 30 May–1 June 2017, pp. 152–153.

29. **US Patent** US20190123441. МПК H01Q3/26, H01Q5/35, H01Q5/50. Multi-antenna module and mobile terminal / Kaoru Sudo, Yasuhisa Yamamoto, Satoshi Tanaka; applicant and patent holder Murata Manufacturing Co. Ltd. — US16/038,464; claimed 2018-07-18; published 2020-01-07.

30. **China Patent** CN209880807U, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-001/52, H01Q-015/24. SIGW circular polarized antenna / SHEN DONGYA, ZHANG XIUPU, MA CHAOJUN, WANG YIAN, REN WENPING, FU ZEXU; applicant and patent holder YUNNAN UNIVERSITY. — CN201920111719.0U; claimed 2019-01-23; published 2019-12-31.

31. **Zhang X., Yan J., Zhang H., Chen Y.** Compact low-temperature cofired ceramic filtering antenna array with high selectivity exploiting substrate integrated waveguide for 5G, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, vol. 61, no. 9, pp. 2046–2048.

32. **China Patent** CN109713444. МПК H01Q1/32, H01Q1/38, H01Q1/48, H01Q1/50. A kind of wideband car radar micro-strip patch antenna / LU SIWEI, DAN ZHIYONG, CHENG YUNPENG; applicant and patent holder DONGHUA UNIVERSITY. — CN201910187943.2A; claimed 2019-03-13; published 2019-05-28.

33. **Kanjanasit K., Wang C.** A High Performance Micromachined CPW Fed Aperture Coupled Compact Patch Antenna Using a Double-Tuned Impedance Matching Method, *2016 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, 24–27 Oct. 2016, pp. 1–5.

34. **Wang J., Wong H., Ji Z., Wu Y.** Broadband CPW-Fed Aperture Coupled Metasurface Antenna, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, vol. 18, no. 3, pp. 517–520.

35. **Huo S.** Design and Simulation of a Aperture Coupled circularly polarization array antenna, *2018 IEEE International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE)*, 10–12 Dec. 2018, pp. 91–95.

36. **Bouça P., Matos J. N., Cunha S. R., Carvalho N. B.** Low-Profile Aperture-Coupled Patch Antenna Array for CubeSat Applications, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 20473–20479.

37. **Ferreira F. G., Vieira J. M., Fumagalli D. P., Pereira L. S., Heckler M. V. T.** Circularly Polarized Aperture-Coupled Microstrip Antenna for Nano-Satellites, *XXXV Simposio Brasileiro de Telecomunicacoes e Processamento de SINAIS – SBRT2017, 3–6 de setembro de 2017*, pp. 57–61.

38. **China Patent** CN110048224A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-005/28. Antenna module / Tszya Yukhu; applicant and patent holder OPPO Guangdong Mobile Communications Co., Ltd. — CN201910243151.2A; claimed 2019-03-28; published 2019-07-23.

39. **Padhi S. K., Karmakar N. C., Law C. L., Aditya S.** A dual polarized aperture coupled circular patch antenna using a C-shaped coupling slot, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, vol. 51, no. 12, pp. 3295–3298.

40. **US Patent** US9537224B2, МПК H01Q 021/06, H01Q 023/00, H04B 007/04. Phased-array transceiver / Daniel J. Friedman, Xiaoxiong Gu, Duixian Liu, Arun S. Natarajan, Scott K. Reynolds, Alberto Valdes Garcia; applicant and patent holder International Business Machines Corp. — US14/725,161; claimed 2015-05-29; published 2017-01-03.

41. **Luo Q., Gao S., Chaloun T., Menzel W., Boccia L., Arneri E., Amendola G., Ziegler V.** Antenna Array Elements for Ka-band Satellite Communication on the Move, *2013 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, pp. 135–139.

42. **US Patent** US7589676B2. МПК H01Q 1/38. Aperture-coupled antenna / Alexander PopugaeV, Rainer Wansch; applicant and patent holder Fraunhofer Gesellschaft zur Forderung der Angewandten Forschung eV. — US11/844,520; claimed 2007-08-24; published 2009-09-15.

43. **US Patent** US20190260115A1, МПК H01Q-001/24, H01Q-021/06, H01Q-009/04, H01Q-021/00. High gain and large bandwidth antenna incorporating a built-in differential feeding scheme / Hamid Reza Memar Zadeh Tehran, Gary Xu, Won Suk Choi; applicant and patent holder Samsung Electronics Co. Ltd. — US16/275,215; claimed 2019-02-13; published 2019-08-22.

44. **US Patent** US20190305430A1, МПК H01Q-009/04, H01Q-021/00, H01Q-019/13. Antenna boards and communication devices / Trang Thai, Sidharth Dalmia; applicant and pat-

ent holder Intel IP Corporation. — US15/939,180; claimed 2018-03-28; published 2019-10-03.

45. **China Patent** CN110611161A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-003/24, H01Q-015/24. Parameter mixing reconfigurable antenna / ZHAO JIAHAO, LI MING, TAO QINGZHANG, LIANG ZHIHENG; applicant and patent holder TSINGHUA UNIVERSITY. — CN201910872001.8A; claimed 2019-09-16; published 2019-12-24.

46. **China Patent** CN110534883A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-001/52, H01Q-015/24, H01Q-021/00, H01Q-021/06. Using the broadband low section dual polarized antenna of Based on Dual-Aperture coupling excitation / AN WENXING, MA KAIXUE, LUO YU; applicant and patent holder TIANJIN UNIVERSITY. — CN201910643724.0A; claimed 2019-07-17; published 2019-12-03.

47. **China Patent** CN110518351A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-021/06, H01Q-021/22. A kind of dual polarization millimeter wave antenna unit and aerial array / FENG BOTAO, CHEN JUNLONG; applicant and patent holder SHENZHEN UNIVERSITY. — CN201910877217.3A; claimed 2019-09-17; published 2019-11-29.

48. **China Patent** CN109830802. МПК H01Q1/38, H01Q1/48, H01Q1/50, H01Q9/04. A kind of millimeter wave dual-polarized patch antenna / Shi Jin, Yin Zhiwei, Yang Shi; applicant and patent holder Nantong Zhisheng Microelectronics Technology Co., Ltd. — CN201810513396.8A; claimed 2019-01-08; published 2019-05-31.

49. **Gan Z., Tu Z.-H., Xie Z.-M., Chu Q.-X., Yao Y.** Compact Wideband Circularly Polarized Microstrip Antenna Array for 45 GHz Application, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no. 11, pp. 6388–6392.

50. **Wei Z., Zhai H., Ma S., Yang D., Xue K.** A low-profile broadband circular polarization filtering Antenna, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2018, vol. 60, no. 12, pp. 3029–3033.

51. **China Patent** CN110350307A, МПК H01Q-001/36, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-015/24, H01Q-021/00, H01Q-021/06. A sequential phase-fed circularly polarized dielectric resonant antenna array / JIANG ZHAONENG, ZHAO XIAOYAN, ZHAO HONGZHI, HUANG SHICHUN, XUAN XIAOFENG, HUANG YING, JI FANGZHENG, WANG ZHIXIN; applicant and patent holder HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. — CN201910630139.7A; claimed 2019-07-12; published 2019-10-18.

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

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

Сдано в набор 21.06.2021. Подписано в печать 27.07.2021. Формат 60×88 1/8. Заказ МС421. Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Авансд солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансд солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье А. П. Лисицкого, П. П. Мальцева, О. С. Матвеевко, А.О. Михалева,
 А. А. Трофимова, В. Р. Скрынского
 «РАЗВИТИЕ АПЕРТУРНО- И ЕМКОСТНО- СВЯЗАННЫХ АНТЕНН. ОБЗОР»

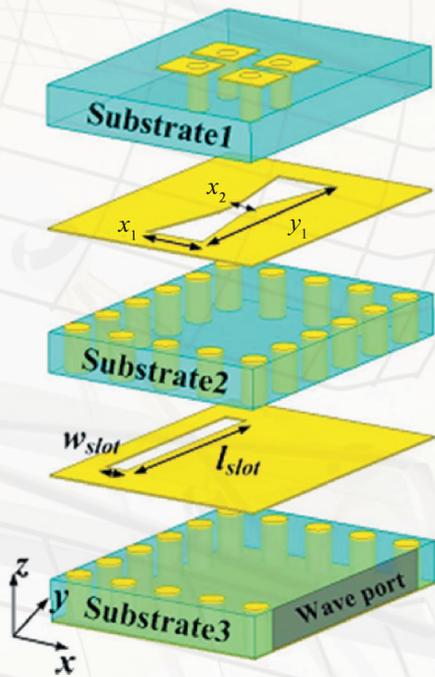


Рис. 14. Строение излучателя с SIW-структурами

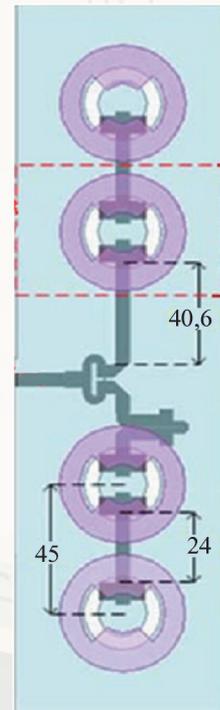
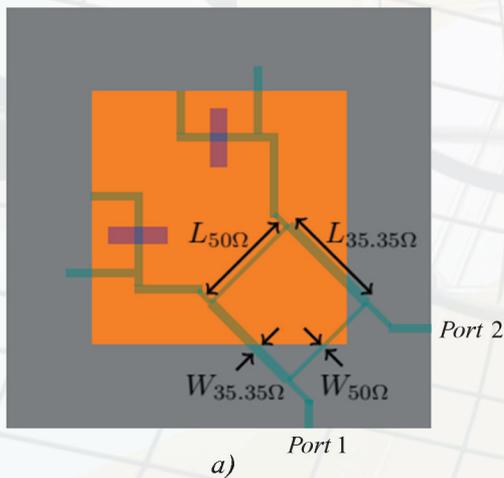
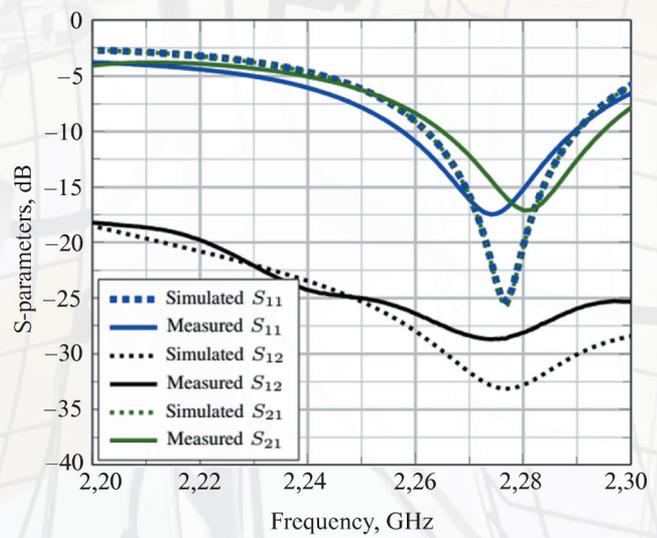


Рис. 26. Строение линейной решетки АСА



а)



б)

Рис. 41. АСА с квадратным мостом:
 а – строение; б – частотные характеристики

Рисунки к статье А. П. Лисицкого, П. П. Малыцева, О. С. Матвеевко, А.О. Михалева,
 А. А. Трофимова, В. Р. Скрынского
«РАЗВИТИЕ АПЕРТУРНО- И ЕМКОСТНО- СВЯЗАННЫХ АНТЕНН. ОБЗОР»

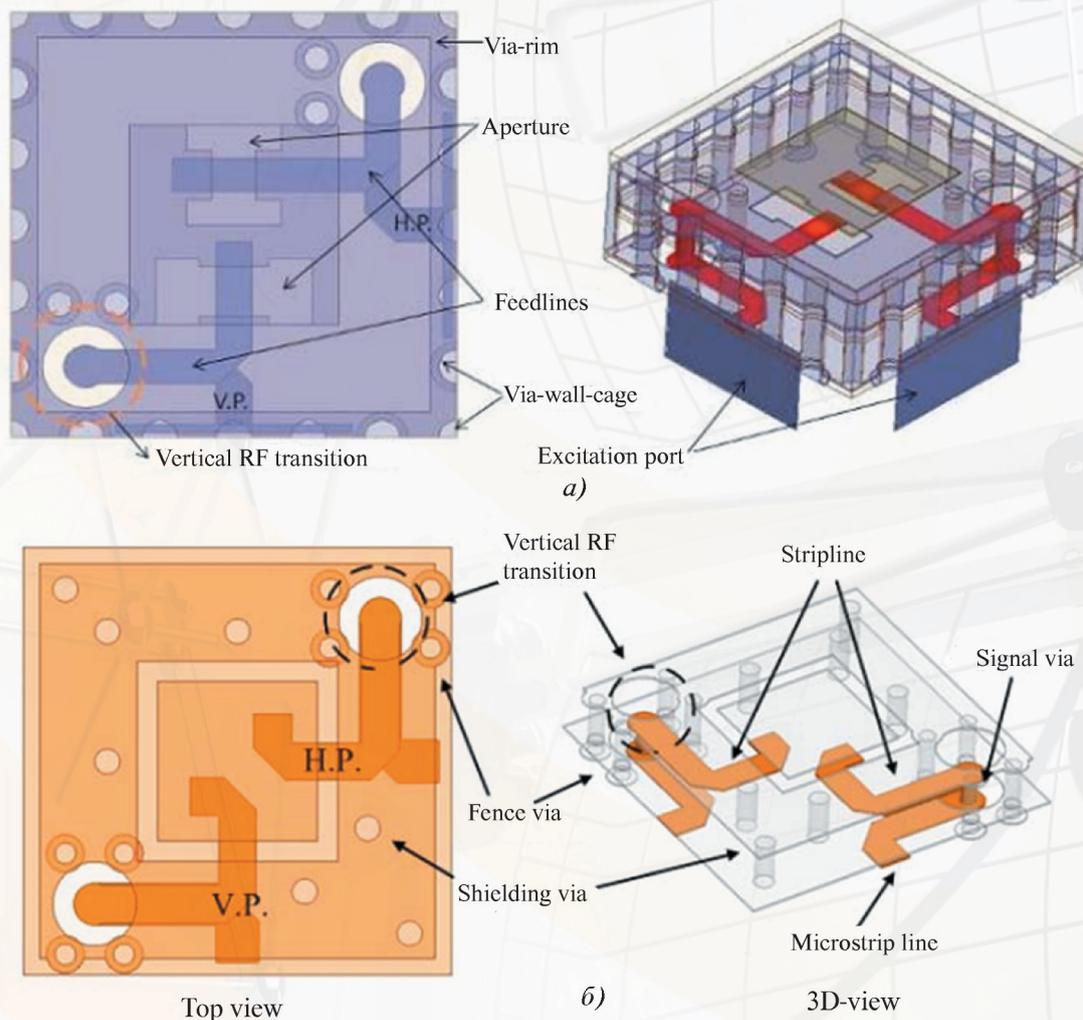


Рис. 45. АСА излучатель ФАР (а) и излучатель ФАР с емкостной связью (б)

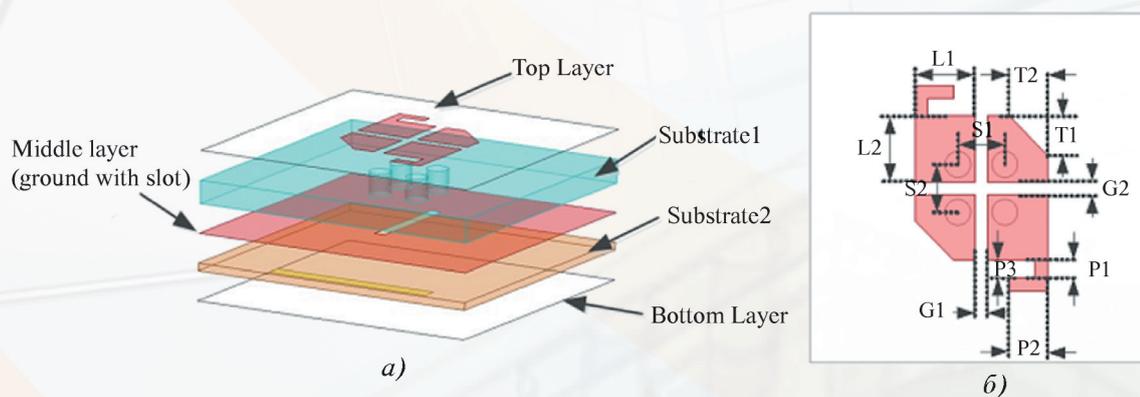


Рис. 55. Структура антенны (а) и топология монополей (б)