

ISSN 1813-8586

# НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

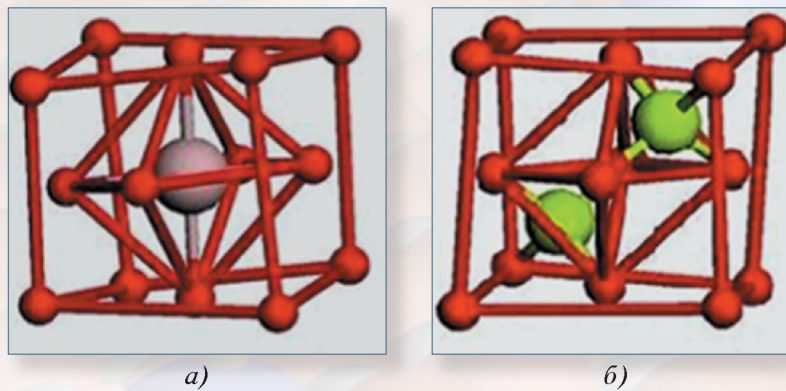
- Нанотехнологии
- Зондовая микроскопия
- Микромашины и наносистемы
- Молекулярная электроника
- Биоактивные нанотехнологии
- Элементы датчиков и биочипы
- Микроэлектромеханические системы
- Микрооптоэлектромеханические системы
- Биомикроэлектромеханические системы

Том 23. № 2. 2021

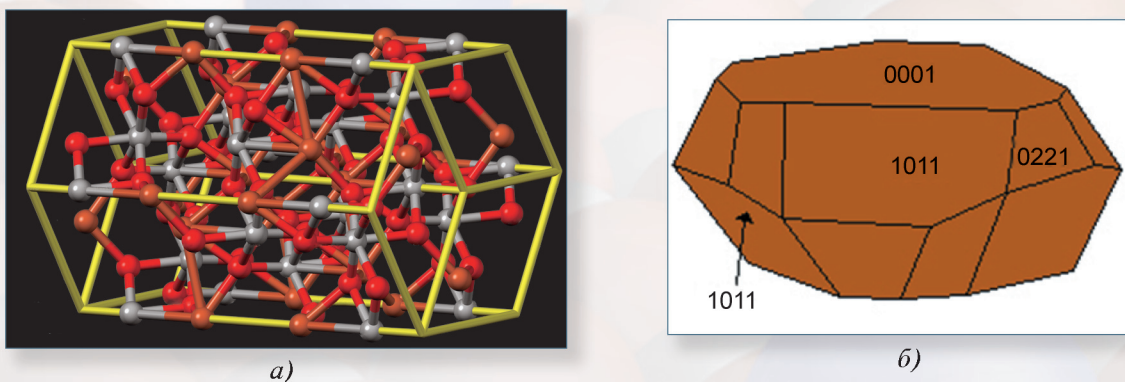




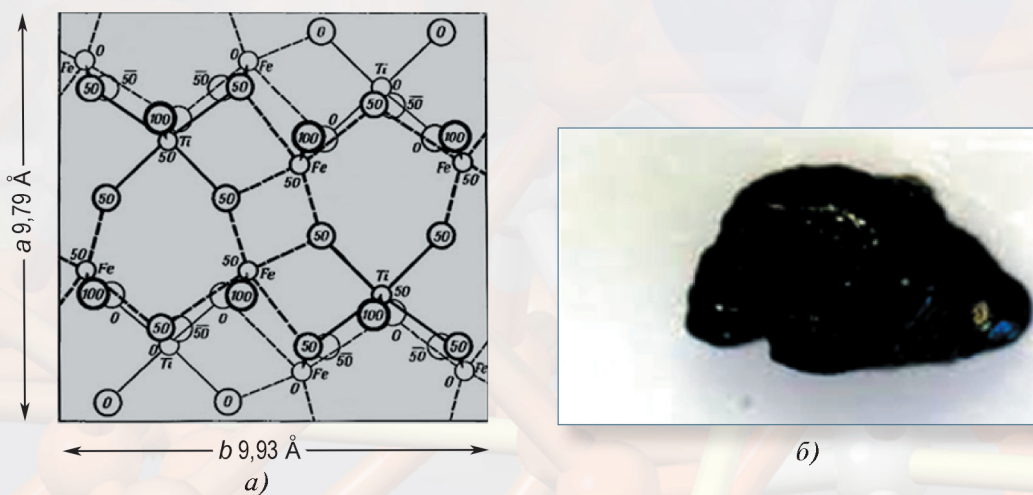
Рисунки к статье В. М. Юрова, В. И. Гончаренко, В. С. Олешко  
**«АНИЗОТРОПИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ  
 И ТОЛЩИНЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУР»**



**Рис. 1. Кристаллическая структура магнетита  $Fe_3O_4$ :**  
*a* – красные шары  $O^{2-}$ , фиолетовый шар  $Fe^{2+}$ ; *б* – красные шары  $O^{2-}$ , зеленые шары  $Fe^{3+}$



**Рис. 2. Кристаллическая структура ильменита:**  
*a* – желтый – железо (Fe), серый – титан (Ti), красный – кислород (O); *б* – габитус ильменита



**Рис. 3. Структура псевдобрукита и его минерал:**  
*a* –  $Fe_2TiO_5$  – псевдобрукит ромбический; *б* – минерал псевдобрукита

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 23. № 2 ✧ 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

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

**Юров В. М., Гончаренко В. И., Олешко В. С.** Анизотропия поверхностной энергии и толщины поверхностного слоя магнитных наноструктур . . . . . 59

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

**Тимошенко С. П., Анчутин С. А., Зарякин Н. М., Калугин В. В., Кочурин Е. С., Тимошенко А. С., Боев Л. Р.** Проектирование и изготовление чувствительного элемента МЭМС-акселерометра . . . . . 63

### ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

**Алтухов А. А.** Сравнительные исследования детекторов ионизирующих излучений, изготовленных на основе алмазных пластин различного типа . . . . . 68

**Масальский Н. В.** Синтез низковольтных логических вентилях на КНИ КМОП-нанотранзисторах с полностью охватывающим затвором . . . . . 75

**Пономарев Д. С.** Элементная база фотопроводящих полупроводниковых устройств для генерации терагерцового излучения . . . . . 82

### СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

**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 . . . . . 88

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. 2

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

### SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

**Yurov V. M., Goncharenko V. I., Oleshko V. S.** Anisotropy of Surface Energy and Thickness of the Surface Layer of Magnetic Nanostructures . . . . . 59

### MODELLING AND DESIGNING OF MNST

**Timoshenkov S. P., Anchutin S. A., Zarjankin N. M., Kalugin V. V., Kochurina E. S., Timoshenkov A. S., Boev L. R.** Research and Development of MEMS Accelerometer's Sensor . . . . . 63

### MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

**Altukhov A. A.** Comparative Studies of Ionizing Radiation Detectors Made on the Basis of Various Types of Diamond Plates . . . . . 68

**Masalsky N. V.** Synthesis of Low-Voltage Logic Gates on Surrounding Gate SOI CMOS Nanotransistors . . . . . 75

**Ponomarev D. S.** Photoconductive Semiconductor-Based Optoelectronic Devices for Generation of Terahertz Radiation . . . . . 82

### SYSTEM ON A CHIP

**Lisitsky A. P., Maltsev P. P., Matveenko O. S., Mikhalev A. O., Trofimov A. A., Skrinisky V. R.** Trends in the Development of Planar Radiating Systems in the Millimeter Wavelength Range. Monopoles and Dipoles. Review . . . . . 88

Web: [www.microsystems.ru/eng](http://www.microsystems.ru/eng); e-mail: [nmst@novtex.ru](mailto:nmst@novtex.ru)



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

УДК 620.179.1

DOI: 10.17587/nmst.23.59-62

**В. М. Юров**, канд. физ.-мат. наук, доц., директор НИЦ, e-mail: exciton@list.ru,

Карагандинский университет имени Е. А. Букетова, Караганда, Казахстан,

**В. И. Гончаренко**, д-р техн. наук, доц., директор Военного института МАИ, e-mail: fvo@mai.ru,

**В. С. Олешко**, канд. техн. наук, доц., МАИ, e-mail: ovs\_mai@mail.ru,

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

## АНИЗОТРОПИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ И ТОЛЩИНЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУР

*Поступила в редакцию*

*Приведен расчет анизотропии поверхностной энергии и толщины поверхностного слоя некоторых магнитных наноструктур. В качестве примера рассмотрены минералы магнетита, ульвештинели, ильменита и псевдобрукита, имеющие различные кристаллические структуры.*

**Ключевые слова:** наноструктура, магнетизм, толщина поверхностного слоя, анизотропия поверхностной энергии

### Введение

Настоящая работа является продолжением статей [1–3], в которых предложена эмпирическая модель поверхностного слоя металла, состоящая из слоев  $R_0$ ,  $R(I)$ ,  $R(II)$ ,  $R_\infty$ . Слой  $R_0$  называется слоем де Бройля,  $R_0 = \lambda_{дБ} = \hbar/p$  и для металлов составляет от 0,01 до 0,1 нм. В этом слое начинаются квантовые размерные эффекты. Размерные эффекты в слое  $R(I)$  определяются всем коллективом атомов в системе (коллективные процессы). Такие "квазиклассические" размерные эффекты наблюдаются только в наноструктурах и для металлов составляют от 1 до 7 нм. Слой  $R(II)$  простирается примерно до размера  $R(II) \approx 9R = R_\infty$  ( $< 100$  нм), где начинается объемная фаза. В слое  $R(II)$  должно быть много размерных эффектов, связанных с оптикой, магнетизмом и другими физическими свойствами. Уравнение А. И. Русанова [4], связывающее поверхностную энергию с размером частицы, справедливо только в слое  $R(I)$ . Учет этого уравнения в нашей модели приводит к анизотропии кристаллической решетки металла.

В настоящей работе показано, как рассчитывать анизотропию поверхностной энергии и толщину поверхностного слоя некоторых магнитных наноструктур. В настоящее время интенсивно исследуют как классические магнитные наноструктуры (например,  $Fe_3O_4$ ) [5–12], так и новые (например,  $CoFe_2B_4$ ) [13–19]. Однако предлагаемый подход предложен нами впервые.

### Методика расчета и его результаты

В работе [20] показано, что с точностью до 3 % выполняется соотношение

$$\sigma = 10^{-3} T_m, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — удельная поверхностная энергия;  $T_m$  — температура плавления твердого тела, К. Соотношение выполняется для всех металлов и других кристаллических соединений. При  $T = T_m$  получим [20]:

$$R(I)_M = 0,24 \cdot 10^{-9} v. \quad (2)$$

Уравнение (2) показывает, что толщина поверхностного слоя  $R(I)$  определяется одним фундаментальным параметром — молярным (атомным) объемом элемента  $v = M/\rho$ , где  $M$  — молярная масса, г/моль;  $\rho$  — плотность, г/см<sup>3</sup>. Объем периодически изменяется в соответствии с таблицей Д. И. Менделеева.

В работе [4] А. И. Русанов при постоянстве температуры и состава фазы ( $\alpha$ ) при малых  $r$  получил следующую линейную зависимость:

$$\sigma = Kr, \quad (3)$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от температуры и состава фазы ( $\alpha$ );  $r$  — радиус кривизны поверхности натяжения.

Из уравнения (3) следует, что в области малых радиусов кривизны независимо от специфики системы поверхностное натяжение всегда понижается



с уменьшением радиуса кривизны и становится равным нулю, когда радиус кривизны поверхности натяжения обращается в нуль. Проведем сравнение формул (1) и (3) (приравняем их):

$$\sigma = KR(I) = 10^{-3}T_m. \quad (4)$$

Откуда имеем:

$$K = 10^{-3}T_m/R(I); \quad \sigma = 10^{-3}T_m/R(I)r. \quad (5)$$

Здесь  $T_m$  — температура плавления наноструктуры. Наличие в уравнении (5) координаты  $r(x, y, z)$  или  $r(a, b, c)$ , где  $a, b, c$  — это параметры (направления) кристаллической решетки, приводит к анизотропии поверхностного натяжения. Окончательно имеем:

$$\begin{aligned} R(I)_{x=a} &= 0,54 \cdot 10^{-11}x(a)^3, \\ R(I)_{y=b} &= 0,54 \cdot 10^{-11}y(b)^3, \\ R(I)_{z=c} &= 0,54 \cdot 10^{-11}z(c)^3, \\ \sigma_a &= 10^{-3}T_mR_a(I)/R(I), \\ \sigma_b &= 10^{-3}T_mR_b(I)/R(I), \\ \sigma_c &= 10^{-3}T_mR_c(I)/R(I). \end{aligned} \quad (6)$$

Воспользуемся уравнениями (1) и (6) и рассчитаем толщину поверхностного слоя магнитных наноструктур (табл. 1).

С помощью уравнения (6) рассчитаем анизотропию поверхностной энергии магнитных наноструктур (табл. 2).

Анизотропию для магнетита ( $Fe_3O_4$ ) и ульвешпинели ( $Fe_2TiO_4$ ) можно вычислить по формуле (7) (которая является аналогом формулы (1)), где  $l_{hkl}$  — толщина первой координационной сферы в направлении  $(hkl)$ , которая для кристаллов с гранецентрированной (ГЦК) кубической структурой задается соотношениями:

$$\sigma(hkl) = 10^{-3}T_m l_{hkl}. \quad (7)$$

$$Fd3m, Z = 4; l_{100} = a; l_{110} = a/\sqrt{2}; l_{111} = 2a/\sqrt{3},$$

Таблица 1

Толщина поверхностного слоя магнитных наноструктур и число монослоев

Минерал	Структура	$R(I)_a$ , нм	$R(I)_b$ , нм	$R(I)_c$ , нм
$Fe_3O_4$	Кубическая	11,1 (13)	—	—
$Fe_2TiO_4$	Кубическая	11,0 (13)	—	—
$FeTiO_3$	Тригональная	7,1 (14)	—	15,1 (11)
$Fe_2TiO_5$	Ромбическая	50,8 (52)	53,2 (54)	2,8 (8)

Таблица 2

Анизотропия поверхностной энергии магнитных наноструктур

Минерал	Структура	$\sigma(T_m)$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\sigma_a$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\sigma_b$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\sigma_c$ , Дж/м <sup>2</sup>
$Fe_3O_4$	Кубическая	1,870	1,870	—	—
$Fe_2TiO_4$	Кубическая	1,648	1,648	—	—
$FeTiO_3$	Тригональная	1,638	1,530	—	3,354
$Fe_2TiO_5$	Ромбическая	1,973	7,710	8,074	0,425

где  $Z$  — число атомов (координационное число) ГЦК структуры;  $a$  — параметр решетки (характеризуется длиной ребра куба).

Соответствующие расчеты приведены в табл. 3. Здесь же даны значения поверхностной энергии при 300 К (при комнатной температуре) и ее линейной зависимости.

### Обсуждение результатов эксперимента

$Fe_3O_4$  — магнетит относится к ферритам, где ионы кислорода формируют кубическую гранецентрированную решетку, в которой на один двухвалентный ион железа достается два трехвалентных иона железа [12], поэтому образуются две магнитные подрешетки (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Из табл. 1 следует, что толщина поверхностного слоя магнетита составляет около 11 нм. Именно такие размеры магнетита (~10 нм) используют в биомедицинской сфере. Например, предложено использовать их как компонент терапии различных видов рака для доставки лекарственных препаратов, повышения контрастности изображения в магнитно-резонансной томографии [21]. Анизотропия поверхностной энергии магнетита показана в табл. 3. Из нее следует, что магнетит кристаллизуется в кубической системе и обычно образует октаэдрические игольчатые кристаллы, что соответствует направлению (110) с минимальной энергией активации 0,94 эВ процесса кристаллизации [22].

В работе [1] была экспериментально определена поверхностная энергия магнетита Соколовского и Сарбайского месторождений с использованием размерной зависимости намагниченности. Удельную намагниченность измеряли с помощью вибрационного магнитометра. Размер зерна магнетита определяли с помощью металлографического микроскопа. Оказалось, что  $\sigma = 1,07$  Дж/м<sup>2</sup> при  $T = 300$  К. Это лежит в пределах погрешности расчетов табл. 3.

$Fe_2TiO_4$  — ульвешпинель имеет такую же структуру, как и магнетит, такую же толщину поверхностного слоя и значение поверхностной энергии.

$FeTiO_3$  — ильменит — минерал класса оксидов. Сингония — тригональная, вид симметрии ромбоэдрический. Кристаллическая структура ильменита аналогична структуре корунда (рис. 2, а, см. вто-

Таблица 3

Анизотропия поверхностной энергии магнетита и ульвешпинели

Минерал	Структура	$(hkl)$	$\sigma(T_m)$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\sigma(300\text{ К})$ , Дж/м <sup>2</sup>
$Fe_3O_4$	Fd3m	100	1,870	1,122
		110	1,336	0,802
		111	2,137	1,282
$Fe_2TiO_4$	Fd3m	100	1,648	0,989
		110	1,177	0,708
		111	1,833	1,100



рую сторону обложки). Главными формами являются пинакоид {0001} и ромбоэдры {1011}, {0221}, {2243} (рис. 2, б, см. вторую сторону обложки).

Из табл. 1 видим, что толщина поверхностного слоя ильменита ( $\text{FeTiO}_3$ ) повышается от 7,1 до 15,1 нм, а число монослоев, наоборот, уменьшается с 14 до 11 вследствие большого значения параметра кристаллической решетки в направлении  $c$ . Изменение поверхностной энергии в направлении  $c$  в два раза больше, чем в направлении  $a$  (см. табл. 2). Кристаллы его имеют толстотаблитчатый облик, иногда чешуйчатый, что характерно для кристаллизации вдоль оси  $a$ .

$\text{Fe}_2\text{TiO}_5$  — псевдобрукит, ромбический, на рис. 3 (см. вторую сторону обложки) изображена проекция структуры на плоскость (001), перпендикулярную короткой оси  $c$ . Все атомы располагаются в плоскостях симметрии (001) на высотах 0,  $c/2$ ,  $c$ . Таким образом, кислородные октаэдры, в центре которых находятся атомы Ti, соединяясь вершинами, образуют цепочки, вытянутые параллельно оси  $c$ . Каждый октаэдр имеет две вершины, но ни одного общего угла или ребра с соседним октаэдром, так что цепочки имеют состав  $\text{TiO}_5$ . Цепочки в поперечных направлениях сочленяются посредством атомов Fe, которые находятся внутри октаэдрических групп из шести атомов кислорода.

Табл. 1 показывает, что в направлении  $a$  и  $b$  толщина поверхностного слоя почти совпадает и составляет около 50 нм, а число монослоев такого же порядка (52). Толщина поверхностного слоя вдоль оси  $c$ , наоборот, мала, равна 2,8 нм и содержит всего 8 монослоев. Таблица 2 показывает, что поверхностная энергия в направлениях  $a$  и  $b$  также превосходит в 20 (!) раз поверхностную энергию в направлении  $c$ .

## Заключение

Анизотропию поверхностного слоя магнитных наноструктур даже атомарно-гладких поверхностей начали изучать сравнительно недавно. Во-первых, это связано с неполным пониманием той роли, которую поверхностная энергия и ее анизотропия играют в наноструктурах, во-вторых, вследствие сложности ее измерения. Предложенная нами модель дает численное значение толщины поверхностного слоя, поверхностной энергии и позволяет оценивать физические процессы, которые происходят в наноструктурах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РК. Гранты № 0118PK000063 и № Ф.0781.*

## Список литературы

1. Юров В. М., Лауринас В. Ч., Гученко С. А. Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких магнитных наноструктур // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 6. С. 347—352.

2. Юров В. М. Толщина поверхностного слоя фторидов щелочноземельных металлов и магния и фторидов природных минералов // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 2. С. 75—78.

3. Юров В. М., Маханов К. М. Оценка температуры плавления наноструктур твердых тел // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 7. С. 347—351.

4. Русанов А. И. Фазовые равновесия и поверхностные явления. Л.: Химия, 1967. 346 с.

5. Tan W. L., Bakar M. A. The Effect of Additives on the Size of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  Particles // Journal of Physical Science. 2006. Vol. 17 (2). P. 37—50.

6. Gorski Ch. A., Scherer M. M. Determination of nanoparticulate magnetite stoichiometry by Mossbauer spectroscopy, acidic dissolution, and powder X-ray diffraction: A critical review // American Mineralogist, 2010, Vol. 95. P. 1017—1026.

7. Ghandoor H. E., Zidan H. M., Khalil M. M. H., Ismail M. I. M. Synthesis and Some Physical Properties of Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) Nanoparticles // Int. J. Electrochem. Sci. 2012. Vol. 7. P. 5734—5745.

8. Lim Y. S., Lai C. W., Hamid S. B. A. et al. A study on growth formation of nano-sized magnetite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  via co-precipitation method // Materials Research Innovations. 2014. Vol. 18. P. 456—461.

9. Ma J., Wang L., Wu Y. et al. Facile Synthesis of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  Nanoparticles with a High Specific Surface Area // Materials Transactions. 2014. Vol. 55, N. 12. P. 1900—1902.

10. Saranya T., Parasuraman K., Anbarasu M., Balamurugan K. XRD, FT-IR and SEM Study of Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) Nanoparticles Prepared by Hydrothermal Method // Nano Vision. 2015. Vol. 5, N. 4—6. P. 149—154.

11. Ali Sh. M., Galal A., Atta N. F., Shammakh Y. Toxic Heavy Metal Ions Removal from Wastewater by Nano-Magnetite: Case Study Nile River Water // Egypt, J. Chem. 2017. Vol. 60, N. 4. P. 601—612.

12. Salviano L. B., Cardoso Th. M. S., Silva G. C. et al. Microstructural Assessment of Magnetite Nanoparticles ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) Obtained by Chemical Precipitation Under Different Synthesis Conditions // Materials Research. 2018. Vol. 21 (2). 7 p.

13. Santos-Durndell V. C., Peruzzolo T. M., Ucoski G. M., Ramos L. P., Nakagak S. Magnetically recyclable nanocatalysts based on magnetite: an environmentally friendly and recyclable catalyst for esterification reactions // Biofuel Research J. 2018. Vol. 18. P. 806—812.

14. Himpsel F. J., Ortega J. E., Mankey G. J., Willis R. F. Magnetic nanostructures // Advances in Physics. 1998. Vol. 47, N. 4. P. 511—597.

15. Ventura J. O. Magnetic Nanostructures. Department of Physics Faculty of Sciences of the University of Porto, 2006. 242 p.

16. Enders A., Skomski R. and Honolka J. Magnetic surface nanostructures // J. Phys. Condens. Matter. 2010. Vol. 22. 32 p.

17. Bennemann K. Magnetic Nanostructures. — Institute of Theoretical Physics FU-Berlin, 2010. 67 p.

18. Levy J.-C. Magnetic Structures of 2D and 3D Nanoparticles: Properties and Applications. — Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2016. 19 p.

19. Korostil A., Krupa M. Spin Transport and Dynamics in Multilayer Magnetic Nanostructures // American Journal of Nano Research and Applications. 2018. Vol. 6 (1). P. 21—33.

20. Юров В. М., Гученко С. А., Лауринас В. Ч. Толщина поверхностного слоя, поверхностная энергия и атомный объем элемента // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2018. Вып. 10. С. 691—699.

21. Khajeh M., Laurent S., Dastafkan K. Nano-adsorbents: classification, preparation, and applications (with emphasis on aqueous media) // Chem. Rev., 2013. Vol. 113, № 10. P. 7728—7768.

22. Красиков А. А. Экспериментальное исследование магнитных свойств наночастиц на основе оксида железа ( $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и нано-ферригидрит). — Дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук, Красноярск, 2016. 124 с.



**V. M. Yurov**, Ph. D., Associate Professor, Director of the Research Center, e-mail: exciton@list.ru, Karaganda University named after E. A. Buketova, Karaganda, Kazakhstan,

**V. I. Goncharenko**, D. Sc., Associate Professor,

Director of the Military Institute of the Moscow Aviation Institute, e-mail: fvo@mai.ru,

**V. S. Oleshko**, Ph. D., Associate Professor, Department of MAI, e-mail: ovs\_mai@mail.ru  
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Yurov Viktor M.**, Associate Professor, Karaganda University named after E. A. Buketov, Karaganda, 100028, Kazakhstan  
E-mail: exciton@list.ru

## Anisotropy of Surface Energy and Thickness of the Surface Layer of Magnetic Nanostructures

Received on: January 23, 2021

Accepted on: February 11, 2021

*In this work, we show how to calculate the surface energy anisotropy and the thickness of the surface layer of some magnetic nanostructures. As an example, the minerals of magnetite, ulvespineli, ilmenite and pseudobrukite, which have different crystal structures, are considered.*

**Keywords:** nanostructure, magnetism, surface layer thickness, surface energy anisotropy

**Acknowledgements:** This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan. Grants № 0118RK000063 and № F.0781.

*For citation:*

**Yurov V. M., Goncharenko V. I., Oleshko V. S.** Anisotropy of Surface Energy and Thickness of the Surface Layer of Magnetic Nanostructures, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 59–62.

DOI: 10.17587/nmst.23.59-62

### References

1. **Yurov V. M., Laurinas V. Ch., Guchenko S. A.** The thickness of the surface layer of atomically smooth magnetic nanostructures, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 6, pp. 347–352 (in Russian).
2. **Yurov V. M.** The thickness of the surface layer of fluorides of alkaline earth metals and magnesium and fluorides of natural minerals, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 75–78 (in Russian).
3. **Yurov V. M., Makhanov K. M.** Estimation of the melting temperature of nanostructures of solids, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 7, pp. 347–351 (in Russian).
4. **Rusanov A. I.** Phase equilibria and surface phenomena. Leningrad, Chemistry, 1967. 346 p. (in Russian).
5. **Tan W. L., Bakar M. A.** The Effect of Additives on the Size of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Particles, *Journal of Physical Science*, 2006, vol. 17 (2), pp. 37–50.
6. **Gorski Ch. A., Scherer M. M.** Determination of nanoparticulate magnetite stoichiometry by Mossbauer spectroscopy, acidic dissolution, and powder X-ray diffraction: A critical review, *American Mineralogist*, 2010, vol. 95, pp. 1017–1026.
7. **Ghandoor H. E., Zidan H. M., Khalil M. M. H. and Ismail M. I. M.** Synthesis and Some Physical Properties of Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) Nanoparticles, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2012, vol. 7, pp. 5734–5745.
8. **Lim Y. S., Lai C. W., Hamid S. B. A.** et al. A study on growth formation of nano-sized magnetite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> via co-precipitation method, *Materials Research Innovations*, 2014, vol. 18, pp. 456–461.
9. **Ma J., Wang L., Wu Y.** et al. Facile Synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles with a High Specific Surface Area, *Materials Transactions*, 2014, vol. 55, no. 12, pp. 1900–1902.
10. **Saranya T., Parasuraman K., Anbarasu M. and Balamugan K.** XRD, FT-IR and SEM Study of Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) Nanoparticles Prepared by Hydrothermal Method, *Nano Vision*, 2015, vol. 5, no. 4–6, pp. 149–154.
11. **Ali Sh. M., Galal A., Atta N. F., Shammakh Y.** Toxic Heavy Metal Ions Removal from Wastewater by Nano-Magnetite: Case Study Nile River Water, *Egypt, J. Chem.*, 2017, vol. 60, no. 4, pp. 601–612.
12. **Salviano L. B., Th. M. S. Cardoso, G. C. Silva et al.** Microstructural Assessment of Magnetite Nanoparticles (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) Obtained by Chemical Precipitation Under Different Synthesis Conditions, *Materials Research*, 2018, vol. 21 (2), 7 p.
13. **Santos-Durndell V. C., Peruzzolo T. M., Ucoski G. M., Ramos L. P., Nakagak S.** Magnetically recyclable nanocatalysts based on magnetite: an environmentally friendly and recyclable catalyst for esterification reactions, *Biofuel Research J.*, 2018, vol. 18, pp. 806–812.
14. **Himpel F. J., Ortega J. E., Mankey G. J. and Willis R. F.** Magnetic nanostructures, *Advances in Physics*, 1998, vol. 47, no. 4, pp. 511–597.
15. **Ventura J. O.** Magnetic Nanostructures. — Department of Physics Faculty of Sciences of the University of Porto, 2006, 242 p.
16. **Enders A., Skomski R., Honolka J.** Magnetic surface nanostructures, *J. Phys. Condens. Matter.*, 2010, vol. 22, 32 p.
17. **Bennemann K.** Magnetic Nanostructures. FU, Berlin, Institute of Theoretical Physics. 2010, 67 p.
18. **Levy J.-C.** Magnetic Structures of 2D and 3D Nanoparticles: Properties and Applications, Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2016. 19 p.
19. **Korostil A., Krupa M.** Spin Transport and Dynamics in Multilayer Magnetic Nanostructures, *American Journal of Nano Research and Applications*, 2018, vol. 6 (1), pp. 21–33.
20. **Yurov V. M., Guchenko S. A., Laurinas V. Ch.** The thickness of the surface layer, surface energy and atomic volume of an element, *Physicochemical aspects of studying clusters, nanostructures and nanomaterials*, 2018, vol. 10, pp. 691–699 (in Russian).
21. **Khajeh M., Laurent S., Dastafkan K.** Nanoadsorbents: classification, preparation, and applications (with emphasis on aqueous media), *Chem. Rev.*, 2013, vol. 113, no. 10, pp. 7728–7768.
22. **Krasikov A. A.** Experimental study of the magnetic properties of iron oxide nanoparticles ( $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-ferrhydrite), Thesis for the degree of candidate fiz.-mat. Sciences, Krasnoyarsk, 2016. 124 p. (in Russian).



# МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.3.049.779

DOI: 10.17587/nmst.23.63-67

**С. П. Тимошенко**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., директор ин-та НМСТ, **С. А. Анчутин**<sup>2</sup>, вед. инж., **Н. М. Зарянкин**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, вед. инж., **В. В. Калугин**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., e-mail: viktor118@mail.ru, **Е. С. Кочурина**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, гл. метролог, e-mail: kochurinaes@gmail.com, **А. С. Тимошенко**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, ген. дир., **Л. Р. Боев**<sup>1</sup>, аспирант, e-mail: leo.boev@mail.ru.

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", г. Зеленоград

<sup>2</sup> Общество с ограниченной ответственностью "Лаборатория микроприборов", г. Зеленоград

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА

Поступила в редакцию 12.02.2021

*Приведено краткое описание МЭМС-акселерометра. Проведены расчеты, подтверждающие работоспособность конструкции и расчеты номинальных значений емкостей чувствительного элемента. Дано описание технологии изготовления МЭМС-акселерометра и определены оптимальные режимы плазмохимического травления.*

**Ключевые слова:** преобразователь линейного ускорения, инерциальный датчик, чувствительный элемент, МЭМС-акселерометр, моделирование МЭМС, метод конечных элементов, Bosch-процесс, плазмохимическое травление

### Введение

В настоящее время МЭМС-акселерометры являются одной из наиболее перспективных областей в отрасли инерциальных датчиков. Проектирование и исследование конструкций МЭМС-акселерометров связано с решением задач математической физики. Также немаловажной задачей является соблюдение технологического маршрута, в том числе проведение таких операций, как глубокое травление кремния.

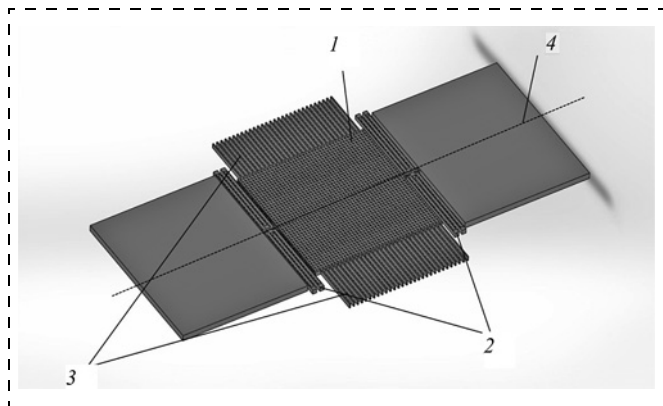
### Моделирование чувствительного элемента МЭМС-акселерометра

Программная система конечно-элементного анализа, используемая при проектировании кремниевого чувствительного элемента, представляет собой набор программных пакетов, предназначенных для решения обширного класса задач методом конечно-элементного моделирования. Механическая и математическая основа указанного программного комплекса представляет собой метод конечных элементов (МКЭ) — наиболее распространенный и достаточно универсальный метод анализа напряженно-деформированного состояния. Основная идея МКЭ состоит в том, что любую непре-

рывную величину (перемещение, температура, давление и т. п.) можно аппроксимировать моделью, состоящей из отдельных элементов (участков). На каждом из этих элементов исследуемая непрерывная величина аппроксимируется кусочно-непрерывной функцией, которая строится на значениях исследуемой непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемого элемента. В общем случае непрерывная величина заранее неизвестна, и нужно определить значения этой величины в некоторых внутренних точках области. После этого можно перейти к общему случаю [1, 2].

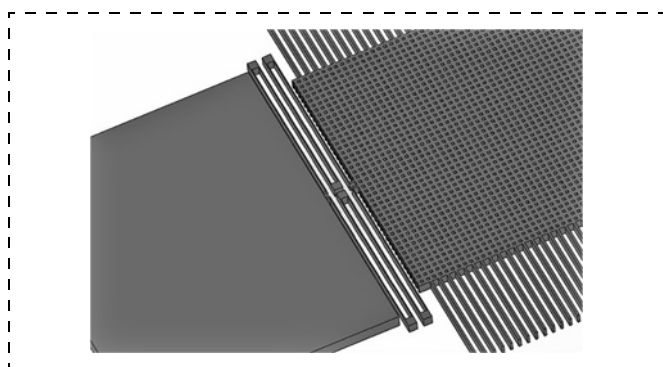
Разработанный чувствительный элемент (ЧЭ) МЭМС-акселерометра представляет собой массу (1), подвешенную на торсионах (2) (рис. 1). В конструкции предусмотрена емкостная система съема сигнала, представляющая собой 30 дифференциальных пар электродов (3). При появлении воздействующего ускорения вдоль оси чувствительности (4) масса 1 перемещается, что приводит к изменению значений емкостей 3.

Чувствительный элемент был изготовлен из монокристаллического кремния <100>. При моделировании учитывалась анизотропия свойств монокристаллического кремния. Анизотропные свойства кремния были промоделированы как свойства



**Рис. 1. Геометрическая модель чувствительного элемента МЭМС-акселерометра:**

1 — инерционная масса; 2 — торсионы; 3 — емкостная система съема сигнала; 4 — ось чувствительности



**Рис. 2. Фрагмент геометрической модели ЧЭ МЭМС-акселерометра**

ортоотропного материала с параметрами, приведенными ниже:

Модуль Юнга .....	169 ГПа
Коэффициент Пуассона .....	0,28
Плотность материала .....	2328 кг/м <sup>3</sup>

На рис. 2 приведен фрагмент разработанной геометрической модели ЧЭ МЭМС-акселерометра.

### Расчеты, подтверждающие работоспособность конструкции

Для подтверждения работоспособности конструкции были проведены модальный анализ и статический расчет, результаты приведены на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Модальный анализ позволил определить собственную частоту ЧЭ (452,83 Гц) и форму колебаний: собственная частота значительно (в 4,5 раза) меньше ближайшей "паразитной" частоты (1825,9 Гц). Проведенный расчет показал, что выбранная форма и размеры торсионов и инерционной массы позволяют изготовить ЧЭ, у которого влияние паразитных частот будет минимальным.

Также был проведен статический расчет, который показал, что максимальное смещение ЧЭ

при воздействии ускорения 1 g составляет 1,25 мкм (рис. 4, см. третью сторону обложки).

Напряженно-деформируемое состояние торсионов и суммарное значение напряжения материала составляет для данной конструкции  $2,5 \cdot 10^7$  Па.

Полученный результат показал, что значение напряжения материала меньше предела прочности для кремния ( $10^9$  Па). При расчете ускорение было задано в 10 раз больше (10 g).

### Расчет номинальных значений емкостей чувствительного элемента

Эквивалентная схема ЧЭ показана на рис. 5.

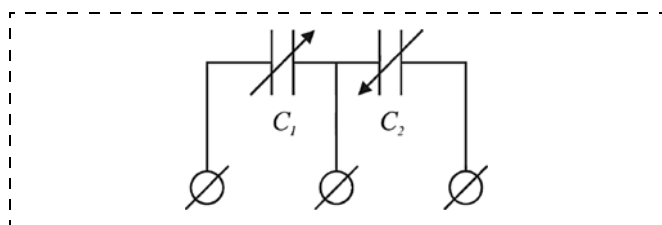
Емкости  $C_1$  и  $C_2$  образуются как сумма индивидуальных емкостей соответствующей гребенчатой структуры. Каждая структура содержит 30 отдельных емкостей. Фрагмент емкостных элементов гребенки ЧЭ показан на рис. 6.

Для каждой гребенки ЧЭ можно записать:

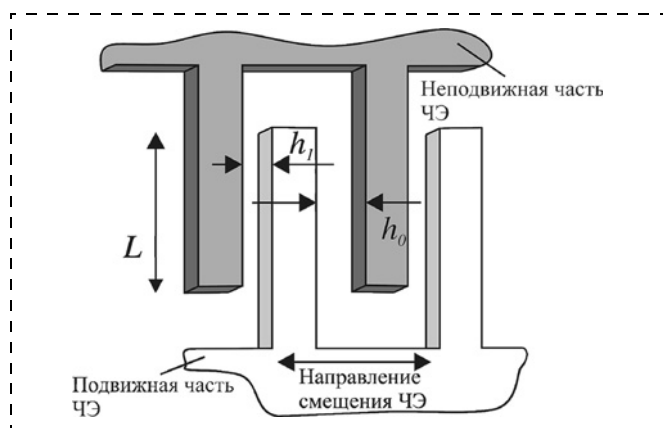
$$C_1 = \epsilon_0 \frac{bL}{h_0 + dx} + \epsilon_0 \frac{bL}{h_1 - dx};$$

$$C_2 = \epsilon_0 \frac{bL}{h_0 - dx} + \epsilon_0 \frac{bL}{h_1 + dx},$$

где  $\epsilon_0 = 8,85$  пФ/м,  $b = 30$  мкм — высота профиля ЧЭ;  $L = 252$  мкм — длина рабочей части электродов (зона перекрытия электродов подвижной и неподвижной частей ЧЭ);  $h_0 = 3$  мкм — номинальный зазор (при отсутствии ускорения, в положении покоя);  $dx = K_M g_Y$  — смещение ЧЭ под дейст-



**Рис. 5. Эквивалентная схема ЧЭ**



**Рис. 6. Схематичное изображение емкостных электродов гребенки ЧЭ**



вием ускорения силы тяжести;  $K_M = 0,08$  мкм/г — крутизна статической характеристики ЧЭ;  $g_Y = g \sin(\alpha) \approx g\alpha$  — проекция ускорения силы тяжести  $g$  на ось чувствительности ЧЭ;  $\alpha$  — малый угол отклонения оси чувствительности ЧЭ от горизонтальной плоскости.

Тогда можно записать для измерителя дифференциальной емкости:

$$C_1 = \varepsilon_0 b L \left( \frac{1}{h_0 + K_M 1 g \alpha} - \frac{1}{h_1 - K_M 1 g \alpha} \right);$$

$$C_2 = \varepsilon_0 b L \left( \frac{1}{h_0 - K_M 1 g \alpha} + \frac{1}{h_1 + K_M 1 g \alpha} \right);$$

$$dC = C_1 - C_2 =$$

$$= \frac{2 b \varepsilon_0 1 g K_M L (h_0^2 - h_1^2)}{(h_0^2 - \alpha^2 (1 g K_M)^2) (h_1^2 - \alpha^2 (1 g K_M)^2)} \alpha.$$

Рассчитанные значения емкостей  $C_1$  и  $C_2$  равняются 29,22 и 30,28 пФ соответственно. Дифференциальная емкость равна 1,058 пФ.

Обозначим масштабный коэффициент ЧЭ (для 30 гребенок):

$$K_\alpha = \frac{2 \cdot 30 b \varepsilon_0 1 g K_M L (h_0^2 - h_1^2)}{h_0^2 h_1^2}.$$

Тогда нелинейность преобразования примет вид:

$$N_3 = \frac{K_\alpha (1 g K_M)^2 (h_0^2 + h_1^2)}{h_0^2 h_1^2};$$

$$\delta N \% = \frac{N_3 \alpha_{\max}^2}{K_\alpha} \cdot 100 \%.$$

Расчетные значения основных параметров ЧЭ (30 гребенок), с диапазоном измерения 1 г будут следующие: масштабный коэффициент ЧЭ акселерометра  $K_M$  равен 0,0035 мкм/г; коэффициент нелинейности преобразования  $\delta N = 0,079$  %.

### Особенности технологии изготовления чувствительного элемента МЭМС-акселерометра

При травлении неглубоких отверстий в кремнии в технологии формирования объемных микроструктур для уменьшения числа операций технологического маршрута и при условии стойкости фоторезиста к условиям процесса травления целесообразно использовать фоторезистивную маску (ФРМ). При травлении глубоких (более 75 мкм) или сквозных отверстий в кремнии, либо при жестких условиях процесса травления кремния целесообразно использовать твердую маску. Кроме того, выбор маски должен быть обусловлен процессами как формирования кремниевого профиля, так и эффективного удаления маски с поверхности

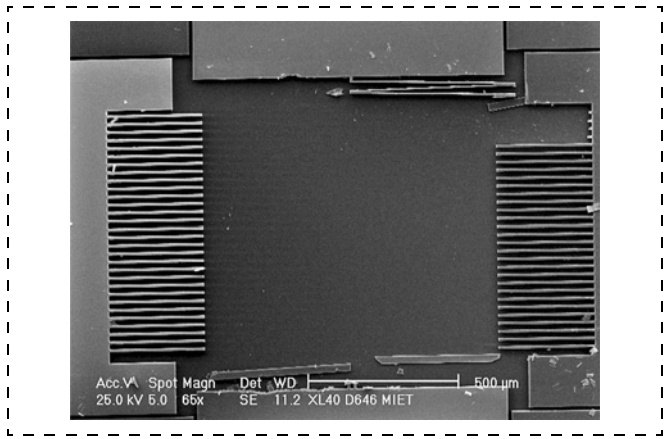


Рис. 7. Брак сложно-профильной структуры — разрушение электромеханических элементов конструкции

кремния. Травление на большую глубину (больше 75 мкм) с использованием ФРМ может приводить к неравномерности бокового подтравы, искажению геометрической формы элементов травления различной прочности конструкции и разрушению структуры (рис. 7).

В настоящее время множество методов для глубокого травления кремния с использованием плазмы. Проведенные исследования показали, что наиболее оптимальным для кремниевых МЭМС является применение ИСР плазмы и Bosch-процесса. Одним из ключевых параметров является давление, от которого зависят физические свойства плазмы, химические процессы, происходящие в объеме рабочей камеры. Существует тенденция к понижению давления при сохранении качества травления кремния. Особенно это актуально для профилей с высоким аспектным отношением. Уменьшение давления приводит к уменьшению числа столкновений ионов с нейтральными частицами в камере, что увеличивает число частиц в зоне реакции. Дополнительным преимуществом является уменьшение вероятности осаждения на поверхности продуктов реакции [3, 4].

Варьируемыми параметрами глубокого травления кремния являются:

Мощность ИСР-разряда	1...3 кВт
Давление в реакторе	1...7 Па
Температура электрода	от 0 до +30 °С
Мощность генератора смещения (400 кГц)	0...500 Вт
Расходы рабочих газов	0...400 см <sup>3</sup> /мин

Достижимое значение селективности довольно высокое и составляет около 75 для фоторезистивной маски. Несмотря на это, на практике возникает необходимость его увеличения. В частности, для травления кремния на глубину более 100 мкм приведенного выше значения селективности к фоторезистивной маске недостаточно. В этом случае целесообразно наносить металлическую маску или

маску из двуокиси кремния. Это усложняет технологический процесс, значительно увеличивая число операций.

При уменьшении температуры электрода с 20 до  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдалось уменьшение подтравы. Это вызвано ослаблением химической реакции между радикалами плазмы и стенками кремниевого профиля. С ростом температуры электрода и температуры в камере наблюдается рост скорости травления. Однако при большой скорости начинают проявляться различные дефекты процесса травления, к которым относятся повышенная шероховатость (рис. 8), искажения формы конструктивных элементов в объеме (рис. 9), нарушение вертикальности стенок профиля (рис. 10).

Путем движения по градиенту был определен режим глубокого травления кремния с повышенной селективностью более 100 для фоторезистивной маски и более 1000 для маски  $\text{SiO}_2$ . Подтверждено, что неоднородность глубины травления кремния в канавках различной ширины (апертурный эффект) уменьшается при увеличении соотношения длительностей стадий пассивации и травления. Путем движения по градиенту найдены условия, при которых неоднородность травления существенно снижена [5].

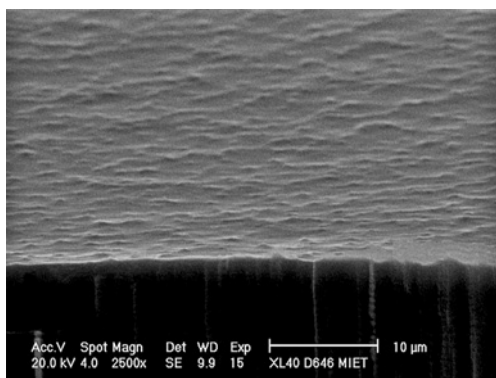


Рис. 8. Повышенная шероховатость поверхности травления полированного кремния на глубину 100 мкм

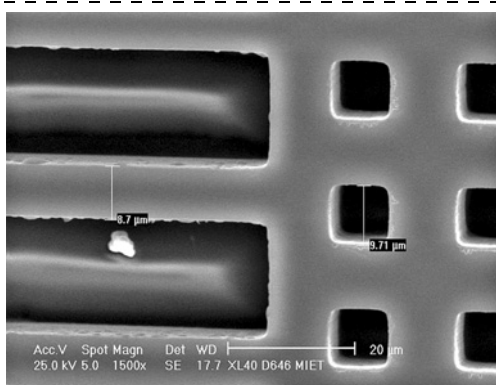


Рис. 9. Искажения формы конструктивных элементов в объеме

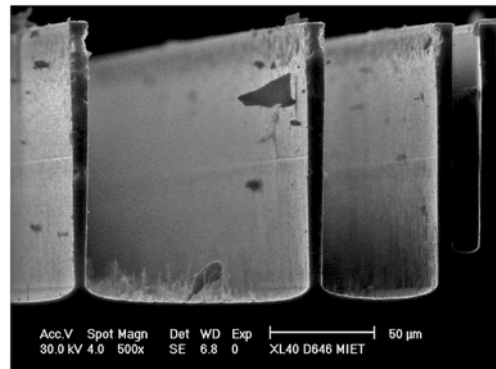


Рис. 10. Нарушение вертикальности стенок профиля

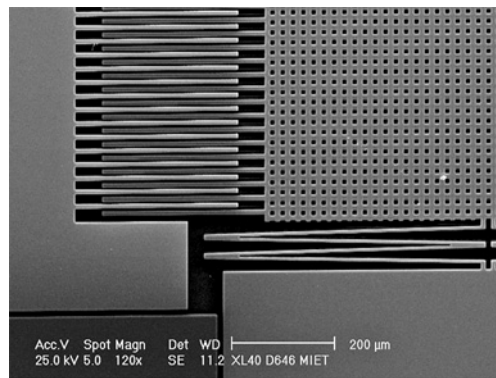


Рис. 11. Фрагмент сложно-профильной конструкции чувствительного элемента МЭМС-акселерометра

Одним из предложенных режимов травления глубоких канавок кремния в Bosch-процессе для разработанной конструкции МЭМС-акселерометра является:

- расход газа  $\text{SF}_6$  —  $300\text{ см}^3/\text{мин}$ ;
- расход газа  $\text{C}_4\text{F}_8$  —  $150\text{ см}^3/\text{мин}$ ;
- скважность подачи газов —  $7/2,5$  с;
- давление газа — 3 Па;
- мощность ИСР-разряда — 2000 Вт;
- мощность смещения — 100 Вт;
- температура подложкодержателя  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Оптимальные режимы травления и правильно подобранные маски в процессе травления позволили получить работоспособный кремниевый элемент.

На рис. 11 приведена фотография изготовленного фрагмента чувствительного элемента МЭМС-акселерометра.

### Заключение

Было проведено моделирование ЧЭ МЭМС-акселерометра с использованием МКЭ. Определена собственная частота конструкции, равная 452,83 Гц. Проведен расчет напряженно-деформируемого состояния при воздействии вдоль оси чувствительности ускорения значениями 1 g и 10 g. Результат статического расчета при воздействии вдоль оси



чувствительности ускорения значением 1 g составляет  $1,25 \cdot 10^6$  м. Для 10 g значение напряжения материала составляет  $2,5 \cdot 10^{-7}$  Па. Это говорит о том, что значение напряжения материала меньше предела прочности для кремния. Проведенный расчет показал, что выбранная форма и размеры торсионов и инерционной массы позволяют изготовить ЧЭ, у которого влияние паразитных частот будет минимальным.

Дифференциальная емкость конденсаторной структуры равна 1,058 пФ. Расчетные значения основных параметров ЧЭ (30 гребенок), диапазоном измерения 1 g: масштабный коэффициент ЧЭ акселерометра  $K_M = 0,0035$  мкм/г; коэффициент нелинейности преобразования  $\delta N = 0,079$  %.

В результате проведенного исследования Bosch-процесса с использованием методов планирования многофакторных экспериментов определены режимы процесса глубокого травления кремния.

Произведены работоспособные кремниевые ЧЭ МЭМС-акселерометров.

#### Список литературы

1. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. Изд. 3-е. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009. 272 с.
2. Семичев Ю. С., Сурков И. А. Влияние плотности разбиения на элементы конструктивного концентратора напряжений на точность расчета методом конечных элементов // Вестник машиностроения. 2012. № 11. С. 39—41.
3. Ефремов А. М., Светцов В. И., Рыбкин В. В. Вакуумно-плазменные процессы и технологии: учеб. Иваново: Изд. ГОУВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т., 2006. 260 с.
4. Айнспрук Н., Браун Д. Плазменная технология в производстве СБИС / пер. с англ. с сокращ. М.: Мир, 1987. 471 с.
5. Виноградов А. И., Зарянкин Н. М., Прокопьев Е. П., Тимошенко С. П. Оптимизация параметров процесса глубокого плазмохимического травления кремния для элементов МЭМС // Известия вузов. Электроника. 2010. № 2 (82). С. 3—9.

S. P. Timoshenkov<sup>1</sup>, D. Sc., Professor, S. A. Anchutin<sup>2</sup>, Lead Engineer, N. M. Zarjankin<sup>2</sup>, Ph. D., Lead Engineer, V. V. Kalugin<sup>1</sup>, D. Sc., Professor, e-mail: viktor118@mail.ru, E. S. Kochurina<sup>2</sup>, Ph. D., Chief metrologist., e-mail: kochurinaes@gmail.com, A. S. Timoshenkov<sup>2</sup>, D. Sc., CEO, L. R. Boev<sup>1</sup>, Postgraduate Student, e-mail: leo.boev@mail.ru

<sup>1</sup> National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow

<sup>2</sup> Limited Liability Corporation "LMD", Moscow

Corresponding author:

Boev Leonid R., Postgraduate Student, National Research University of Electronic Technology (MIET), Zelenograd, Moscow, 124498, Russian Federation, e-mail: leo.boev@mail.ru

## Research and Development of MEMS Accelerometer's Sensor

Received on February 12, 2021

Accepted on February 18, 2021

Currently, MEMS accelerometers are one of the most promising areas in the inertial sensor industry. The design and study of MEMS accelerometers structures is associated with solving problems of mathematical physics. Also, a very important task is to comply with the technological route, including carrying out such operations as deep etching of silicon.

This article describes the modeling of the developed geometric model of the sensitive element MEMS accelerometer. The calculations were carried out, which showed that the developed structure is efficient.

As a result of the study of the Bosch process using methods for planning multifactor experiments, the modes of deep etching of silicon were optimized. Prototypes of sensitive element MEMS accelerometers have been produced.

**Keywords:** linear acceleration transducer, inertial sensor, capacitive accelerometer, sensing element, MEMS accelerometer, MEMS simulation, finite element method, Bosch process, plasma-chemical etching

For citation:

Timoshenkov S. P., Anchutin S. A., Zarjankin N. M., Kalugin V. V., Kochurina E. S., Timoshenkov A. S., Boev L. R. Research and Development of MEMS Accelerometer's Sensor, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 63—67.

DOI: 10.17587/nmst.23.63-67

#### References

1. Kaplun A. B., Morozov E. M., Olf'er'eva M. A. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. Изд. 3-е. Moscow, Knizhnyy dom "LIBROKOM", 2009, 272 p. (in Russian).
2. Semichev Ju. S., Surkov I. A. Vlijanie plotnosti razbi-enija na jelementy konstruktivnogo koncentratora naprjazhenij na tochnost' rascheta metodom konechnyh jelementov, *Vestnik mashinostroenija*, 2012, no. 11, pp. 39—41 (in Russian).

3. Efremov A. M., Svetcov V. I., Rybkin V. V. Vakuumno-plazmennye processy i tehnologii: ucheb. posobie; GOUVPO, Ivanovo, Ivan. gos. him.-tehnol. un-t, 2006, 260 p. (in Russian).
4. Ajnspruk N., Braun D. Plazmennaja tehnologija v proiz-vodstve SBIS: perevod s angl. s sokrashh. Moscow, Mir, 1987, 471 p. (in Russian).
5. Vinogradov A. I., Zarjankin N. M., Prokop'ev E. P., Timoshenkov S. P. Optimizacija parametrov processa glubokogo plazmohimicheskogo travlenija kremnija dlja jelementov MJeMS, *Izvestija vuzov. Elektronika*, 2010, no. 2 (82), pp. 3—9 (in Russian).

А. А. Алтухов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
Производственно-технологический центр "УралАлмазИнвест", г. Москва, altukhov.aa@yandex.ru

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНЫХ ПЛАСТИН РАЗЛИЧНОГО ТИПА

Поступила в редакцию 11.01.2021

*Приведены результаты экспериментов по исследованию явлений поляризации и эффективности сбора зарядов в тестовых структурах алмазных детекторов ионизирующих излучений при использовании алмазных пластин различного типа: монокристаллические HPHT-типа, монокристаллические CVD-типа, а также поликристаллического типа, при воздействии на них  $\alpha$ -излучения с энергией 5,5 МэВ. Исследования продемонстрировали существование ряда проблем приборного качества алмазных пластин, влияющих на работоспособность детекторов спектрометрического типа.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый алмаз, HPHT-технология роста алмаза; CVD-технология роста алмаза, алмазные детекторы ионизирующих излучений, спектрометрические полупроводниковые детекторы

### Введение

Монокристаллический алмаз обладает комплексом уникальных электрофизических параметров, которые привлекают специалистов при создании целого ряда изделий полупроводниковой микро- и оптоэлектроники на его основе [1–3].

Благодаря высокому напряжению пробоя и большой ширине запрещенной зоны ( $E_g = 5,47$  эВ) алмазные детекторы ионизирующих излучений (ДИИ) имеют низкий уровень шума по сравнению с кремниевыми. Большая энергия смещения атомов в кристаллической решетке алмаза придает ему высокую радиационную стойкость, а высокие подвижность носителей заряда и скорость насыщения при больших напряжениях смещения позволяют изготавливать ДИИ с высокими быстродействием и радиационной стойкостью [4–6], которые, в частности, используются на ускорителях частиц для контроля отклонения пучка [7–9] и потока быстрых и медленных нейтронов на экспериментальных реакторах термоядерного синтеза [10, 11].

В настоящее время для изготовления алмазных ДИИ, как правило, используют синтетические алмазы, получаемые по технологии газофазного осаждения (CVD, chemical vapor deposition) [1, 2, 12].

Монокристаллические CVD-алмазные пластины, пригодные для изготовления ДИИ, предлагаются на коммерческой основе [13, 14]. Согласно

заявлению производителя и независимым измерениям [14, 15], при толщине 0,5 мм они имеют эффективность сбора заряда не менее 95 % и разрешение по энергии на уровне менее 1 %.

Производители предлагают также поликристаллические алмазные пластины, которые имеют существенно меньшую стоимость и доступны в больших размерах (76 мм и более в диаметре), которые в настоящее время активно применяют не только в качестве теплоотводящих структур [16], но и как материал для создания активных полупроводниковых приборов на алмазе, включая ДИИ различных типов [17, 18].

Продолжаются исследования в области технологии HPHT (High Pressure-High Temperature), как более производительного и менее затратного метода синтеза по сравнению с методом CVD, включая ее вариант в виде многопуансонной технологии "разрезная сфера" (типа БАРС) [19, 20].

В настоящее время одним из ведущих производителей алмазных монокристаллов по данной технологии, причем не только в России, но и в мире, является компания "New Diamond Technology" (NDT), которая производит и предлагает на коммерческой основе алмазные HPHT-пластины приборного качества [21] с размерами от  $2,5 \times 2,5$  мм до  $10 \times 10$  мм и даже до  $15 \times 15$  мм с ориентацией (100). Согласно данным производителя [21] компания предлагает высококачественные пластины из



выращенного (синтетического) HPHT-алмаза, которые не имеют напряжений, дефектов, поверхностных трещин и сколов, а основными преимуществами пластин являются большая рабочая бездефектная поверхность, идеальная кристаллическая структура, низкий уровень дислокаций и неконтролируемых примесей.

В настоящей работе представлены результаты исследований тестовых структур ДИИ на основе алмазных монокристаллических HPHT- и CVD-пластин, а также на основе поликристаллических CVD-пластин.

### Постановка эксперимента

Для исследований использовали алмазные монокристаллические HPHT-пластины компании NDT, которые представляли собой плоскопараллельные образцы типа 2-а алмаза размером  $3 \times 3$  мм, толщиной 0,5 мм с кристаллографической ориентацией (100). Перечень выполненных технологических операций и измерений представлен в табл. 1.

Al-контакты (0,1 мкм) наносили на верхнюю и нижнюю поверхности пластин через маску  $2,5 \times 2,5$  мм магнетронным распылением в среде аргона (Ar) при давлении 10 мТорр. Измерения электрического сопротивления между поверхностями и торцами пластин проводили мегомметром с пределом измерения 100 ГОм.

Знак "+" в таблице означает "вне диапазона" используемого мегомметра. Плазмохимическая обработка (ПХО), проводимая по 10 мин с каждой стороны, удаляет по 2...5 мкм алмазного слоя с каждой поверхности пластин и использована в целях удаления следов графитизации, которые могут образовываться при операциях лазерного конфигурирования, а также для удаления нарушенного де-

фектного приповерхностного слоя, возникающего при механической обработке. Наличие следов графита на поверхности может привести к паразитным утечкам тока и/или вносить погрешности при измерении электрического сопротивления между поверхностями и торцами алмазных пластин.

Над образцом (в экранирующем Al-корпусе) на расстоянии менее 1 мм располагался  $\alpha$ -источник  $^{238}\text{Pu}$  ( $E = 5,5$  МэВ) с интенсивностью  $4 \text{ с}^{-1} \cdot \text{мм}^{-2}$ . Между источником и образцом установлена диафрагма с окном  $2,5 \times 2,5$  мм. Время набора каждого спектра 10 мин. Для измерения  $\alpha$ -спектра к контактному слою структур были подключены усилитель с внутренним шумом 1,5 % (ширина пика на половине высоты при подаче сигнала с генератора с амплитудой, равной амплитуде сигнала от  $\alpha$ -источника) и многоканальный анализатор SBS-77 фирмы "Грин Стар" со встроенным источником напряжения смещения; разрешение по времени составляло 2 мкс, напряжение смещения — +100 В на верхнем контакте.

На рис. 1—8 приведены данные измерений тестовых структур, на которых показано распределение сигналов по амплитуде (спектр) в результате облучения.

На рис. 1 приведены данные для образца NDT-1 (сторона 1). Черным цветом показан начальный спектр, белым цветом — спектр через 10 мин после начала облучения. Из рис. 1 видно, что в первые ~10 мин измерений (за время набора 1-го спектра) центр пика смещается на ~10 % вправо, далее (за 2 ч) форма спектра осталась неизменной.

На рис. 2 приведены данные измерений для стороны 2 образца NDT-1. Черным цветом показан начальный спектр, белым цветом — через 2 ч после начала облучения. Из рис. 2 видно, что на графике

Перечень выполненных технологических операций и измерений

Таблица 1

№	Операция/кристалл	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
1	Измерение сопротивления между верхней и нижней гранями при 250/500 В	+/+	1,6/0,6 МОм	5,7/1,0 МОм	46/0,09 ГОм
2	Измерение сопротивления по торцам при 250 В	+/+	90 МОм	11 МОм	+/+
3	Напыление Al-контактов	+			+
4	Измерение сопротивления между контактами при 250/500 В	+/+			7/4,5 ГОм
5	Контроль работоспособности	$\alpha$ -спектр			$\alpha$ -спектр
6	Удаление Al-контактов				+
7	Плазмохимическая обработка (травление) с обеих сторон	—	$2 \times 10$ мин	$2 \times 10$ мин	$2 \times 10$ мин
8	Измерение сопротивления между верхней и нижней гранями при 250/500 В	+/+		40/11 МОм	+/+
9	Напыление Al-контактов		+		+
10	Измерение сопротивления между контактами при 250/500 В		+/+		+/+
11	Контроль работоспособности		$\alpha$ -спектр		$\alpha$ -спектр
12	Удаление Al-контактов	+			
13	Плазмохимическая обработка (травление) с обеих сторон	$2 \times 10$ мин		$2 \times 10$ мин	
14	Измерение сопротивления между верхней и нижней гранями при 250/500 В	+/+		24/2 МОм	
15	Напыление Al-контактов	+			
16	Контроль работоспособности	$\alpha$ -спектр			

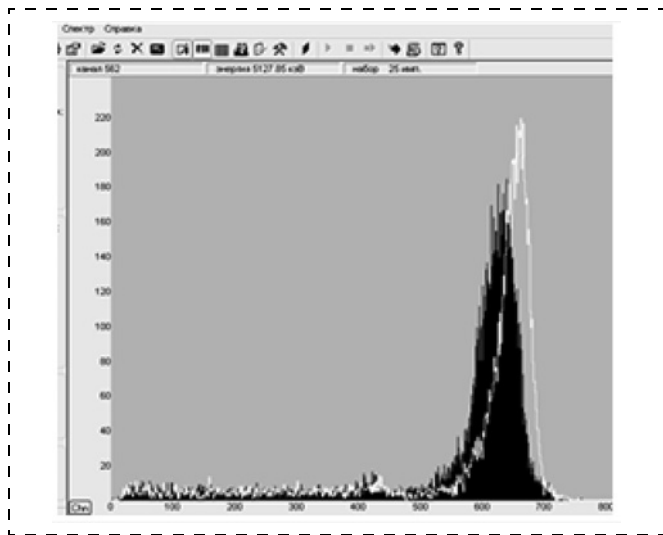


Рис. 1. Образец NDT-1 (сторона 1)

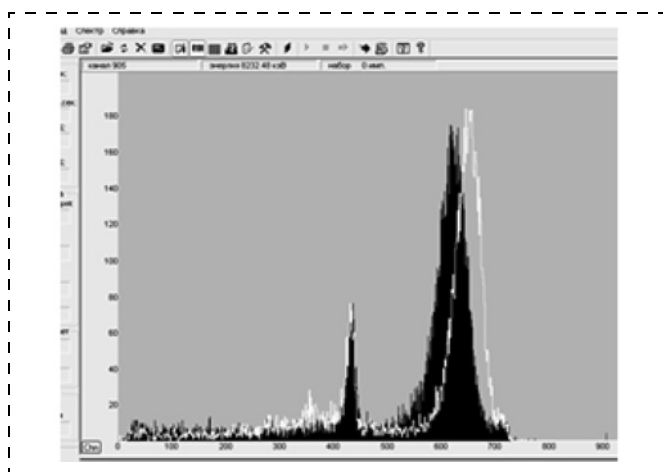


Рис. 2. Образец NDT-1 (сторона 2)

присутствует пик (в районе 435 канала), это свидетельствует о наличии в образце дефектной зоны с эффективностью сбора заряда примерно 65 %. Площадь дефектной зоны равна ~9 %.

Так как дополнительный пик наблюдается только при измерениях с одной стороны образца, то это позволяет предполагать, что дефектная зона находится только с одной стороны пластины. Данная зона содержит ловушки для электронов, что следует из того факта, что измерения проводили при положительном смещении, т. е. в режиме дырочного дрейфа. Последующая операция ПХО и повторные измерения не изменили форму спектров и поведение данной структуры. Выполненные измерения для образца NDT-1 показали, что тестовая структура имеет энергетическое разрешение примерно 10 % (в начале измерений), при облучении образца в течение двух часов его поляризация не проявлялась (не была обнаружена). На рис. 3 приведены данные измерения для образца NDT-2 (сторона 1). Черным цветом показан начальный

спектр, белым цветом — спектр через 2 ч после начала облучения.

На рис. 4 приведены данные измерения для образца NDT-2, где черным цветом показаны измерения для стороны 2, белым цветом — для стороны 1. Для стороны 1 образца NDT-2 (см. рис. 3) видно, что в первые ~10 мин измерений (за время набора 1-го спектра) центр пика смещается на ~10 % вправо, далее (за 2 ч) форма спектра не меняется. Энергетическое разрешение на стороне 1 в начале измерений — 4 %, время поляризации (время, за которое высота пика уменьшается в 2 раза) ~2,5 ч.

На рис. 5 приведены результаты измерения для образца NDT-4 (сторона 1). Черный график — после первоначального нанесения контактов, белый график — после ПХО и повторного нанесения контактов.

На рис. 6 и 7 приведены данные для образца NDT-4 при проведении проверки на поляризацию

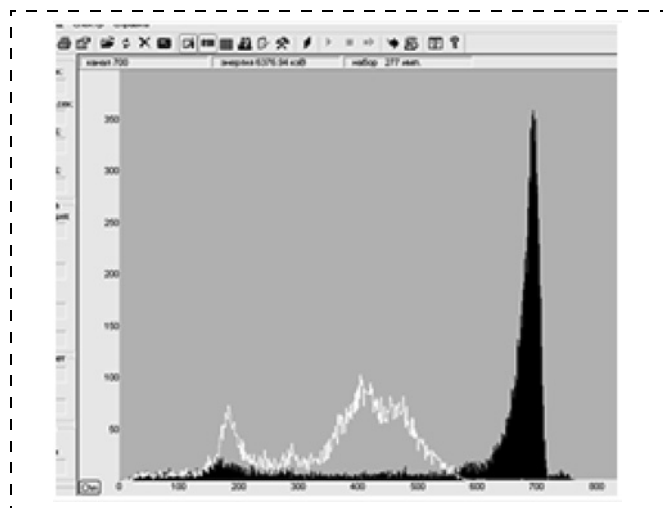


Рис. 3. Образец NDT-2 (сторона 1). Черный цвет — начальный спектр, белый цвет — спектр через 2 ч облучения

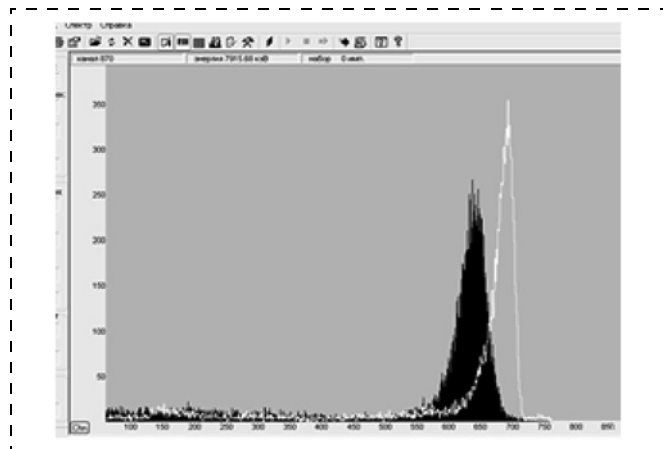


Рис. 4. Образец NDT № 2. Черный цвет — измерения для стороны 2, белый цвет — для стороны 1

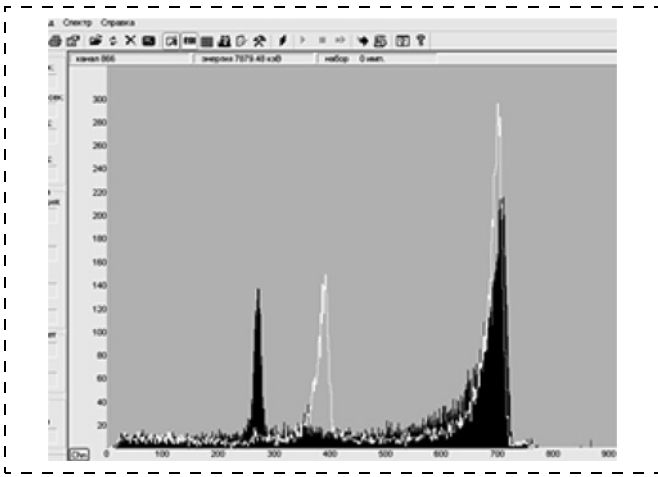


Рис. 5. Образец NDT-4 (сторона 1). Черный цвет — после первоначального нанесения контактов, белый цвет — после ПХО и повторного нанесения контактов

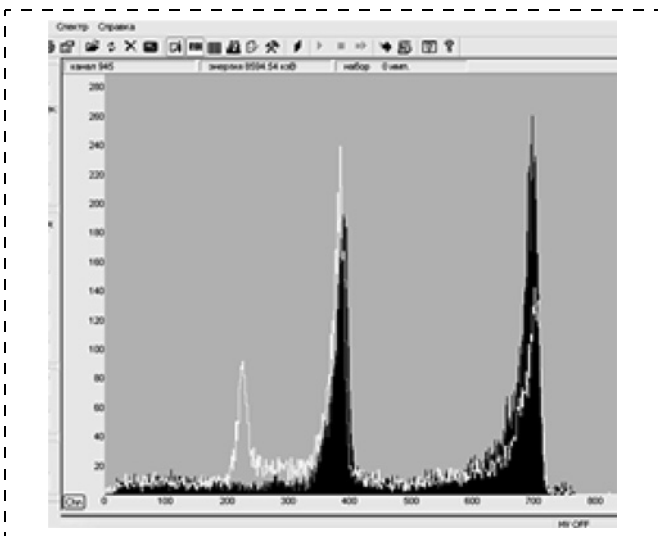


Рис. 6. Образец NDT-4 (сторона 1). Черный цвет — начальный спектр, белый цвет — через 2 ч облучения

после ПХО и повторного нанесения контактов; черный цвет на рис. 6 — начальный спектр, белый цвет — через 2 ч облучения. Высокий пик (см. рис. 6) на стороне 1 означает наличие в образце дефектной зоны площадью около 29 %. После ПХО образца NDT-4 пик дефектной зоны сместился из 270-го канала в 390-й.

Это может означать, что дефектная зона представляет собой тонкий слой на одной из поверхностей, так как удаление слоя 1...3 мкм улучшило эффективность сбора заряда с 38 до 56 %. Худшее разрешение на стороне 2 (см. рис. 7, на котором показан начальный спектр для стороны 2) также может быть объяснено наличием дефектной зоны на стороне 1. Энергетическое разрешение на стороне 1 в начале измерений — 3,4 %; время поляризации — 2,3 ч.

Для сравнения на рис. 8 приведены результаты измерения с образцом компании "Е 6" (пластина

типа "detector grade"), с размерами  $3 \times 3 \times 0,3$  мм (образец DB-69) при тех же условиях. Черный спектр на рис. 8 — начальный спектр, белый — через 2 ч облучения. Энергетическое разрешение в начале измерений — 4 %; время поляризации — 2,5 ч.

На рис. 9 показаны обобщенные данные зависимости высоты  $\alpha$ -пика от времени при постоян-

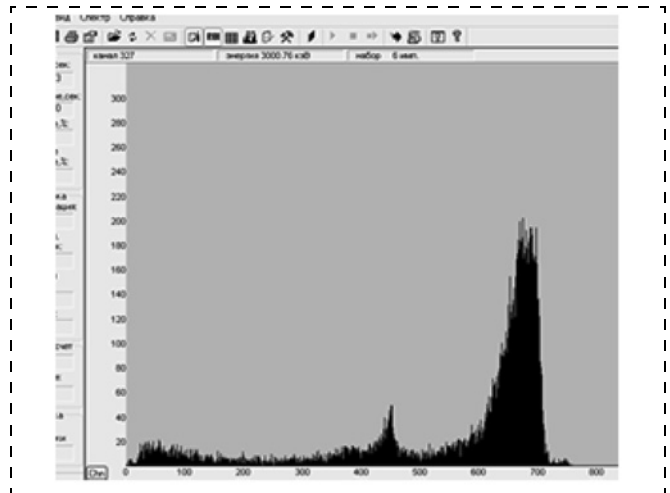


Рис. 7. Образец NDT-4. Сторона 2. (начальный спектр)

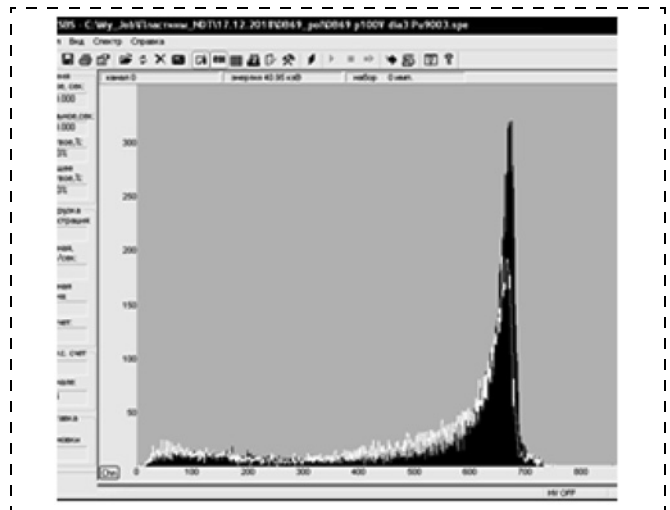


Рис. 8. Образец DB-69

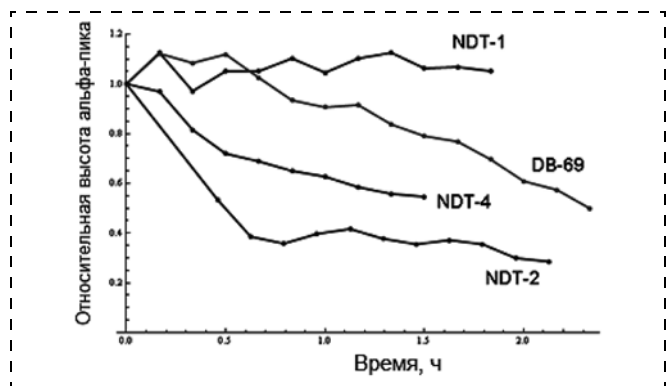


Рис. 9. Зависимость высоты  $\alpha$ -пика от времени при постоянном облучении (для всех образцов)



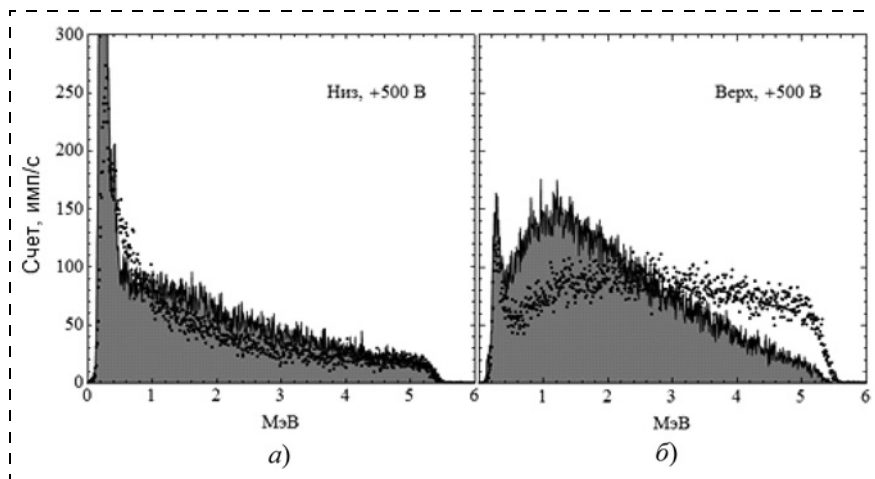


Рис. 10. Спектры детекторных структур на основе поликристаллического CVD-алмаза (на разных сторонах образца)

ном облучении; для наглядности высота пика отнормирована к 1 в начале измерений, которые демонстрируют скорость поляризации (накопление объемного заряда на ловушках/примесях/дефектах тестовых структур).

Как показано в работах [22–24], в ДИИ на основе высококачественных CVD-монокристаллов в режиме дырочного дрейфа наблюдается процесс поляризации в результате длительного воздействия  $\alpha$ -излучения от источников  $^{241}\text{Am}$  или  $^{238}\text{Pu}$ .

Это свидетельствует о наличии в CVD-монокристалле дырочных ловушек с большим временем жизни в заряженном состоянии. При этом, как

показано в работах [22, 23], образец при облучении  $\alpha$ -источником и выключенном напряжении смещения деполяризуется, а без облучения остается поляризованным длительное время. В случае поликристаллического CVD-алмаза поляризация наступает значительно быстрее. Результаты измерений зависят от их предыстории и часто не повторяются. Кроме того, спектры могут отличаться для обеих сторон образца.

CVD-поликристалл состоит из множества малых монокристаллов (зерен) с различной ориентацией. В процессе роста зерна увеличиваются в размерах, поэтому верхняя сторона поликристаллических пластин обычно работает лучше, чем нижняя.

На рис. 10, а и б показаны спектры поликристаллических CVD-алмазных структур при их облучении  $\alpha$ -источником (5,5 МэВ) в аналогичных условиях [25].

Заштрихованная область на рис. 10, а и б показывает спектр в начале измерений, точки — через 30 мин измерений.

Интенсивность облучения составила  $13 \alpha/(\text{с} \cdot \text{мм}^2)$ . Энергетическая шкала откалибрована по структурам на основе монокристаллического CVD-алмаза. Для каждой стороны спектры

Таблица 2

Перечень основных результатов исследований и выводов к ним

Электрофизический параметр	Обозначение образца				
	DB-69	NDT-1	NDT-2	NDT-3	NDT-4
Тип, кристаллографическая ориентация	2а, (100)				
Размер, мм	3,0×3,0×0,3				
Зонность	Монозонный	Мультизонный		Монозонный	
Сопrotивление утечки, ГОм	Больше 100		0,002		
Сбор зарядов, %	100	91	100	71	
Энергетическое разрешение, не хуже, %	4	10	4	3,4	
Скорость поляризации, отн. ед.	1	0,5	5	1,5	
Площадь зон с меньшим сбором зарядов, % (сбор зарядов в зонах менее 70 %)	—	9	—	29	
Преимущества (особенности)	Отсутствие дефектных зон. Энергетическое разрешение 4 %. Большое время поляризации (2,5 ч). Однородность параметров	Отсутствие поляризации за 2 ч измерений	Отсутствие дефектных зон. Энергетическое разрешение 4 %	Энергетическое разрешение 3,4 %. Большое время поляризации (1,7 ч)	
Недостатки	Высокая стоимость	Наличие дефектной зоны площадью 9 %. Низкое энергетическое разрешение (10 %). Небольшой дрейф сигнала (~10 %) в начале измерений	Несколько худшее энергетическое разрешение со стороны 2 кристалла (7 %). Малое время поляризации (0,5 ч)	Сопrotивление на уровне мегаом даже после двукратного травления. Непригоден для изготовления детекторов	Наличие дефектной зоны площадью 29 %

регистрировались в течение 30 мин, время записи каждого спектра 5 мин. Если для верхней стороны скорость счета сохранялась на уровне  $200 \text{ с}^{-1}$ , то для нижней стороны за 30 мин измерений скорость счета упала от 170 до  $120 \text{ с}^{-1}$ . Это означает, что часть  $\alpha$ -частиц дают сигнал с амплитудой, меньшей нижнего порога дискриминации усилителя, и не регистрируются. Попытки снять  $\alpha$ -спектр с поликристаллического CVD-алмаза от источника с интенсивностью  $100 \alpha/(\text{с} \cdot \text{мм}^2)$  привели к тому, что после размещения источника над образцом, он сразу же поляризовался и скорость счета мгновенно падала до  $\sim 20 \text{ с}^{-1}$  (вместо ожидаемой  $1600 \text{ с}^{-1}$  для образца с площадью контактной системы размером  $4 \times 4 \text{ мм}$ ).

На восстановление работоспособности детектора под действием слабого источника уходило около 1 ч. Такие данные свидетельствуют о значительно большей по сравнению с CVD-монокристаллическими алмазными структурами концентрации ловушек заряда в поликристаллических структурах, что ограничивает область их применения.

Перечень основных результатов исследований и выводов к ним приведен в табл. 2.

## Заключение

Проведенные исследования позволили оценить и сравнить эффекты поляризации и показатели эффективности сбора зарядов в тестовых структурах алмазных детекторов ионизирующих излучений, изготовленных на основе пластин различного типа: монокристаллических HPHT-, CVD- и поликристаллического типов при воздействии на них  $\alpha$ -излучения с энергией 5,5 МэВ.

Образцы тестовых структур NDT с номерами 1—4, изготовленные на основе монокристаллического HPHT-алмаза, по основным параметрам (энергетическое разрешение, временная стабильность, отсутствие дефектных зон в материале, время поляризации) существенно уступают образцу DB-69 на основе монокристаллического CVD-алмаза.

Образец NDT-3 оказался неработоспособным для использования его в качестве ДИИ вследствие низкого сопротивления и утечек тока.

Образец NDT-2 быстро поляризуется, что приводит к проблемам его использования в качестве ДИИ.

Образец NDT-1 обеспечивает недостаточное энергетическое разрешение, имеет область площадью 9 % с повышенным уровнем дефектов (примесей), что ведет к уменьшению эффективности сбора зарядов в ней и, соответственно, во всей структуре.

Образец NDT-4 содержит область (площадь примерно 29 %) с повышенным уровнем дефектов

(примесей), что приводит к уменьшению сбора зарядов в данной области и, соответственно, во всем образце.

Образцы NDT 1—4 по основным электрофизическим параметрам непригодны для изготовления спектрометрических ДИИ, но после дополнительного отбора по характеристикам могут быть использованы в дозиметрических ДИИ средней точности.

Для использования монокристаллического HPHT-алмаза при изготовлении высококачественных спектрометрических ДИИ необходимо совершенствование технологии HPHT, включая исследование особенностей процесса роста и их влияния на природу и пространственное распределения дефектных зон, анализ плотности линейных и точечных дефектов, а также прецизионный контроль элементного (примесного) состава кристаллов.

*Автор благодарит канд. физ.-мат. наук, начальника лаборатории ПТЦ "УралАлмазИнвест" Зяблук К. Н. за помощь в проведении экспериментов и обсуждении результатов.*

## Список литературы

1. **Yang N.** (ed.) Novel Aspects of Diamond. From Growth to Applications. Edition 2. Springer, Nature, Switzerland AG. 2019. 517 p.
2. **Хмельницкий Р. А., Талипов Н. Х., Чучева Г. В.** Синтетический алмаз для электроники и оптики. М.: Издательство ИКАР, 2017. 228 с.
3. **Altukhov A. A., Afanasiev M. S., Kvaskov V. B.** et al. Application of diamond in high technology // Inorganic materials. 2004. Vol. 40, Suppl. 1. P. S50—S70.
4. **Kagan H.** [RD42 collaboration]. Diamond detector technology: status and perspectives // PoS Vertex. 2016 (2017). P. 027.
5. **Патент 2565829 РФ**, МПК G01T 3/00; Алмазный детектор тепловых нейтронов // Алтухов А. А., Зяблук К. Н., Колюбин В. А. [и др.]. Заявитель и патентообладатель ООО "ПТЦ "УралАлмазИнвест". 2014119120/28, заявл. 13.05.2014. опубл. 20.10.2015, Бюл. № 29.
6. **Altukhov A. A., Zaharchenko K. V., Kolyubin V. A.** et al. Selective detector of cosmic particles based on diamond sensitive elements // International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2015) / IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 675 (2016) 042027 doi: 10.1088/1742-6596/675/4/042027.
7. **Berdermann E., Pomorski M., de Boer W.** et al. Diamond detectors for hadron physics research // Diamond and Related Materials. 2010. Vol. 19. P. 35.
8. **Edwards A. J., Brau B., Bruinsma M.** et al. Radiation Monitoring With Diamond Sensors in BABAR // Trans. Nucl. Sci. 2004. Vol. 51. P. 1808.
9. **Cindro V., Dobos D., Dolenc I.** et al. The ATLAS Beam Conditions Monitor // J. Inst. 2008. Vol. 3. P. 02004.
10. **Angelone M., Lattanzi D., Pillon M.** et al. Development of single crystal diamond neutron detectors and test at JET tokamak. JET-EFDA contributors. // Nucl. Instr. Met. Phys. Res. A. 2008. Vol. 595. P. 616.
11. **Артемьев К. К., Родионов Н. Б., Амосов В. Н., Крайильников В. А.** и др. Разработка конструкции алмазного детектора для алмазного спектрометра нейтральных частиц

ИТЭР // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 3. С. 63–68.

12. **Ральченко В. Г., Конов В. И.** CVD-алмазы. Применение в электронике. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. В. 4. С. 58–67.

13. **Element Six**, a De Beers Group Company. <https://e6cvd.com>

14. **The Element Six CVD Diamond Handbook.** Available online: [https://e6cvd.com/media/wysiwyg/pdf/E6\\_CVD\\_Diamond\\_Handbook\\_A5\\_v10X.pdf](https://e6cvd.com/media/wysiwyg/pdf/E6_CVD_Diamond_Handbook_A5_v10X.pdf)

15. **Shimaoka T., Kaneko J. H., Tsubota M.** High-performance diamond radiation detectors produced by lift-off method // Eur. Phys. Lett. 2016. Vol. 113. P. 62001.

16. **Мальцев П. П., Редькин С. В., Глинский И. А.** и др. Теплоотводы на поликристаллическом алмазе для мощных СВЧ монолитных интегральных схем // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 4. С. 195–208.

17. **Reichmann M.** [RD42 collaboration]. New test beam results of 3D and pad detectors constructed with poly-crystalline CVD diamond // Nucl. Instr. and Meth. A. 2019. P. 162675.

18. **Bani L.** [RD42 collaboration]. A study of the radiation tolerance of poly-crystalline and single-crystalline CVD diamond to 800 MeV and 24 GeV protons // J. Phys. D: Appl. Phys. / 2019. 52. P. 465103.

19. **Tanimura Y., Kaneko J., Katagiri M.** et al. Diamond radiation detector made of an ultrahigh-purity type IIa diamond crystal grown by high-pressure and high-temperature synthesis // Rev. Sci. Instrum. / 72. 1406–1410. 2001. DOI: 10.1063/1.1319596

20. **Пальянов Ю. Н.** Где растут алмазы? // Наука из первых рук. 2008. № 1 (19). С. 12–31.

21. **Сайт** компании "New Diamond Technology" [http://ndt-company.com/ru/products/diamond\\_plates\\_rus/](http://ndt-company.com/ru/products/diamond_plates_rus/)

22. **Ибрагимов Р. Ф., Кадиллин В. В., Тюрин Е. М., Колобин В. А.** Исследование явления поляризации в алмазных детекторах ионизирующих излучений // Вестник "МИФИ". 2014. Т. 3, № 4. С. 416–422.

23. **Rebai M., Fazzi A., Cazzaniga C.** et al. Time-stability of a single-crystal diamond detector for fast neutron beam diagnostic under alpha and neutron irradiation // Diamond and Related Materials. 2015. Vol. 61. DOI: 10.1016/j.diamond.2015.11.002

24. **Sato Y., Murakami H., Shimaoka T.** et al. Charge-collection efficiency and long-term stability of single-crystal CVD diamond detector under different carrier-drift conditions // Japanese J. Appl. Phys. 2016. Vol. 55. P. 046401-1–5.

25. **Зяблюк К. Н., Колобин В. А., Алтухов А. А.** и др. Исследование процесса поляризации монокристаллического алмазного CVD-детектора. // Материалы научно-практической конференции "Интеграция образования, науки и производства" Узбекистан, г. Карши, 22.09.2020.

26. **Zakharchenko K. V., Altukhov A. A., Ibragimov R. F.** et al. Diamond detectors of space radiation: the ways to counter the polarization effect. // The Eleventh Moscow solar system symposium 11M-S3 October 5–9, 2020. Space Research Institute of Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia 11M-S3 – Abstract\_book\_full\_version\_04.pdf. / 2020. P. 87–88.

**A. A. Altukhov**, Senior Researcher, e-mail: [uai-co@yandex.ru](mailto:uai-co@yandex.ru)

Industrial-technological center "Uralalmazinvest" LLC; Moscow, 121108, Russian Federation

*Corresponding author:*

**A. A. Altukhov**, Senior Researcher, "Industrial-technological center "Uralalmazinvest" Ltd., Moscow, 121108, Russian Federation, e-mail: [uai-co@yandex.ru](mailto:uai-co@yandex.ru)

## Comparative Studies of Ionizing Radiation Detectors Made on the Basis of Various Types of Diamond Plates

Received on January 11, 2021

Accepted on February 05, 2021

*The results of experiments on the study of polarization phenomena and the charge collection efficiency in test structures of diamond ionizing radiation detectors using diamond plates of various types, including single-crystal NRNT-type, single-crystal CVD-type, as well as polycrystalline type, when exposed to alpha-radiation with an energy of 5.5 MeV are presented. Studies have demonstrated the existence of a number of problems with the device quality of diamond plates that affect the performance of spectrometric-type detectors.*

**Keywords:** semiconductor diamond, HPHT-diamond; CVD-diamond, polycrystalline diamond; detectors of ionizing radiation, spectrometric semiconductor detectors; polarization phenomena; charge collection efficiency

*For citation:*

**Altukhov A. A.** Comparative Studies of Ionizing Radiation Detectors Made on the Basis of Various Types of Diamond Plates, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 2, p. 68–75

DOI: 10.17587/nmst.20.68-75

### References

1. **Yang N.** (ed.). Novel Aspects of Diamond. From Growth to Applications. Edition 2. Springer Nature Switzerland AG, 2019, p. 517.

2. **Khmelnitsky R. A., Talipov N. H., Chucheva G. V.** Synthetic diamond for electronics and optics. Moscow, IKAR Publishing House, 2017. 228 p.

3. **Altukhov A. A., Afanasiev M. S., Kvaskov V. B.** [et al]. Application of diamond in high technology, *Inorganic materials*, 2004, vol. 40, suppl. 1, pp. 50–70.

4. **Kagan H.**, et al. [RD42 collaboration]. Diamond detector technology: status and perspectives, PoS Vertex, 2016 (2017), 027.

5. **Altukhov A. A., Zyablyuk K. N., Kolyubin V. A., Konov V. I., Ralchenko V. G.** Patent 2565829 of the Russian Federation, G01T 3/00; Diamond detector of thermal neutrons. Applicant and patent holder of LLC "ITC "Uralalmazinvest". 2014119120/28, declared on 13.05.2014. published on 20.10.2015.

6. **Altukhov A. A., Zaharchenko K. V., Kolyubin V. A.** et al. Selective detector of cosmic particles based on diamond sensitive elements/ International Conference on Particle Physics and As-



trophysics (ICPPA-2015), *IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series* 675, 2016, 042027 doi: 10.1088/1742-6596/675/4/042027

7. **Berdermann E., Pomorski M., de Boer W.** et al. Diamond detectors for hadron physics research. *Diamond and Related Materials*, 2010, vol. 19, p. 35.

8. **Edwards A. J., Brau B., Bruinsma M.** et al. Radiation monitoring with diamond sensors in BABAR, *Trans. Nucl. Sci.*, 2004, 51, p. 1808.

9. **Cindro V., Dobos D., Dolenc I.** et al. The ATLAS Beam Conditions Monitor, *J. Inst.*, 2008, vol. 3, p. 02004.

10. **Angelone M., Lattanzi D., Pillon M.** et al. Development of single crystal diamond neutron detectors and test at JET tokamak. JET-EFDA contributors, *Nucl. Instr. Met. Phys. Res. A*, 2008, vol. 595, p. 616.

11. **Artemyev K. K., Rodionov N. B., Amosov V. N., Krasilnikov V. A.** Razrabotka konstrukcii almaznogo detektora dlja almaznogo spektrometra nejtural'nyh chastic ITER, *Pribory i tekhnika jeksperimenta*, 2019, N. 3, pp. 63–68 (in Russian).

12. **Ralchenko V. G., Konov V. I.** CVD-almazny. Primenenie v jelektronike, *Elektronika: Nauka, Tehnologija, Biznes*, 2007, vol. 4, pp. 58–67 (in Russian).

13. **Element Six**, De Beers Group. <https://e6cvd.com>.

14. **The Element Six** CVD Diamond Handbook. Available online: [https://e6cvd.com/media/wysiwyg/pdf/E6\\_CVD\\_Diamond\\_Handbook\\_A5\\_v10X.pdf](https://e6cvd.com/media/wysiwyg/pdf/E6_CVD_Diamond_Handbook_A5_v10X.pdf) (accessed on 11 July 2020).

15. **Shimaoka T., Kaneko J. H., Tsubota M.** High-performance diamond radiation detectors produced by lift-off method, *Eur. Phys. Lett.*, 2016, 113, p. 62001.

16. **Maltsev P. P., Redkin S. V., Glinsky I. A.** Teplootvody na polikristallicheskom almaze dlja moshhnyh SVCh monolitnyh integral'nyh shem. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 195–208 (in Russian).

17. **Reichmann M.** [RD42 collaboration]. New test beam results of 3D and pad detectors constructed with poly-crystalline CVD diamond, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 2019, p. 162675.

18. **Bani L.** [RD42 collaboration]. A study of the radiation tolerance of poly-crystalline and single-crystalline CVD diamond to 800 MeV and 24 GeV protons, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2019, vol. 52, p. 465103.

19. **Tanimura Y., Kaneko J., Katagiri M.** Diamond radiation detector made of an ultrahigh-purity type IIa diamond crystal grown by high-pressure and high-temperature synthesis, *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, vol. 72, pp. 1406–1410, DOI: 10.1063/1.1319596

20. **Palyanov Yu. N.** Gde rastut almazy? *Nauka iz pervyh ruk.*, 2008, no. 1 (19), pp. 12–31 (in Russian).

21. [http://ndtcompany.com/ru/products/diamond\\_plates\\_rus](http://ndtcompany.com/ru/products/diamond_plates_rus).

22. **Ibragimov R. F., Katilin V. V., Tyurin E. M., Kolybin V. A.** Issledovanie javlenija poljarizacii v almaznyh detektorah ionizirujushhij izluchenij, *Vestnik MIFI*, 2014, vol. 3, no. 4, pp. 416–422 (in Russian).

23. **Rebai M., Fazzi A., Cazzaniga C.** [et al]. Time-stability of a single-crystal diamond detector for fast neutron beam diagnostic under alpha and neutron irradiation, *Diamond and Related Materials*, 2015, vol. 61, DOI: 10.1016/j.diamond.2015.11.002.

24. **Sato Y., Murakami H., Shimaoka T.** et al. Charge-collection efficiency and long-term stability of single-crystal CVD diamond detector under different carrier-drift conditions, *Japanese J. Appl. Phys.*, 2016, vol. 55, pp. 046401–1–5.

25. **Zyablyuk K. N., Kolyubin V. A., Altukhov A. A.** Issledovanie processa poljarizacii monokristallicheskogo almaznogo CVD-detektora, *Materialy nauchno-prakticheskoj konferencii "Integracija obrazovaniya, nauki i proizvodstva, Uzbekistan Republic, Karshi University*, 22.09.2020.

26. **Zakharchenko K. V., Altukhov A. A., Ibragimov R. F.** et al. Diamond detectors of space radiation: the ways to counter the polarization effect, *The Eleventh Moscow solar system symposium 11M-S3 October 5–9, 2020. Space Research Institute Of Russian Academy Of Sciences. Moscow, Russia 11M-S3*, Abstract\_book\_full\_version\_04.pdf, 2020, pp. 87–88.

УДК 621.382.323

DOI: 10.17587/nmst.23.75-82

**Н. В. Масальский**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., e-mail: volkov@niisi.rar.ru

Федеральное государственное учреждение "Федеральный научный центр

Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук", Москва

## СИНТЕЗ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ВЕНТИЛЕЙ НА КНИ КМОП-НАНОТРАНЗИСТОРАХ С ПОЛНОСТЬЮ ОХВАТЫВАЮЩИМ ЗАТВОРОМ

Поступила в редакцию 28.01.2021

Обсуждаются вопросы синтеза низковольтных логических вентилях, выполненных на цилиндрических с полностью охватывающим затвором КНИ КМОП-нанотранзисторах, в диапазоне напряжения питания до 0,8 В. С помощью математического моделирования на основе разработанных TCAD-моделей n- и p-типов цилиндрических КНИ КМОП-нанотранзисторов с полностью охватывающим затвором и с привлечением математического ядра программы HSPICE анализируются низковольтные динамические характеристики сложных логических вентилях.

**Ключевые слова:** технология "кремний на изоляторе", цилиндрический КНИ КМОП-нанотранзистор с полностью охватывающим затвором, логический вентиль, низкая потребляемая мощность

### Введение

Дальнейший рост эффективности кремниевых интегральных схем напрямую связан с использованием новых транзисторных архитектур [1, 2]. Структуры кремний-на-изоляторе (КНИ) получи-

ли признание как базовый материал для развития нанoeлектроники. Чтобы эффективно использовать площадь, занимаемую КНИ-транзистором, канал может быть индуцирован не только с планарной стороны, но в идеале по всей поверхности рабочей области [1–4]. В настоящей работе исследу-

дуются потенциальные возможности применения цилиндрических КНИ КМОП-нанотранзисторов с полностью охватывающим затвором для низковольтных цифровых приложений. В такой транзисторной архитектуре появляется возможность более эффективного управления зарядом в его рабочей области в первую очередь за счет ее конструктивных параметров [5–7]. Помимо этого она характеризуется эффективным подавлением короткоканальных эффектов (ККЭ) и низким значением емкости. Это обуславливает в совокупности с сокращением занимаемой площади снижение уровня рассеиваемой мощности [8].

В современных цифровых схемах для ограничения снижения производительности напряжение питания и пороговое напряжение имеют тенденцию к масштабированию с одним и тем же коэффициентом [9]. Комбинация этих параметров снижает значение параметра "задержка × мощность", при том что число транзисторов на кристалле продолжает увеличиваться вследствие уменьшения топологических норм [1, 10]. Для решения сформулированной выше задачи в настоящей работе с помощью математического моделирования на основе разработанных здесь же TCAD-моделей *n*- и *p*-типов цилиндрических КНИ КМОП-нанотранзисторов с полностью охватывающим затвором анализируются динамические характеристики сложных логических вентилях с низким напряжением питания.

## 1. Моделирование транзисторов

Моделирование вольт-амперных характеристик (ВАХ) прототипов кремниевого полевого КНИ КМОП-нанотранзистора с цилиндрической геометрией и полностью охватывающим затвором в диапазоне управляющих напряжений от 0 до 0,8 В проводили в программе DESSIS пакета ISE TCAD [11]. Для моделирования использована трехмер-

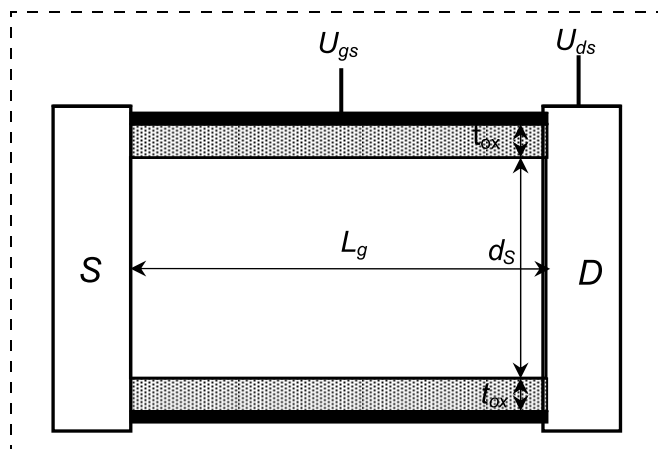


Рис. 1. Схема транзистора:

$U_{gs}$  — напряжение на затворе;  $U_{ds}$  — напряжение на стоке;  $L_g$  — длина рабочей области (и одновременно затвора)

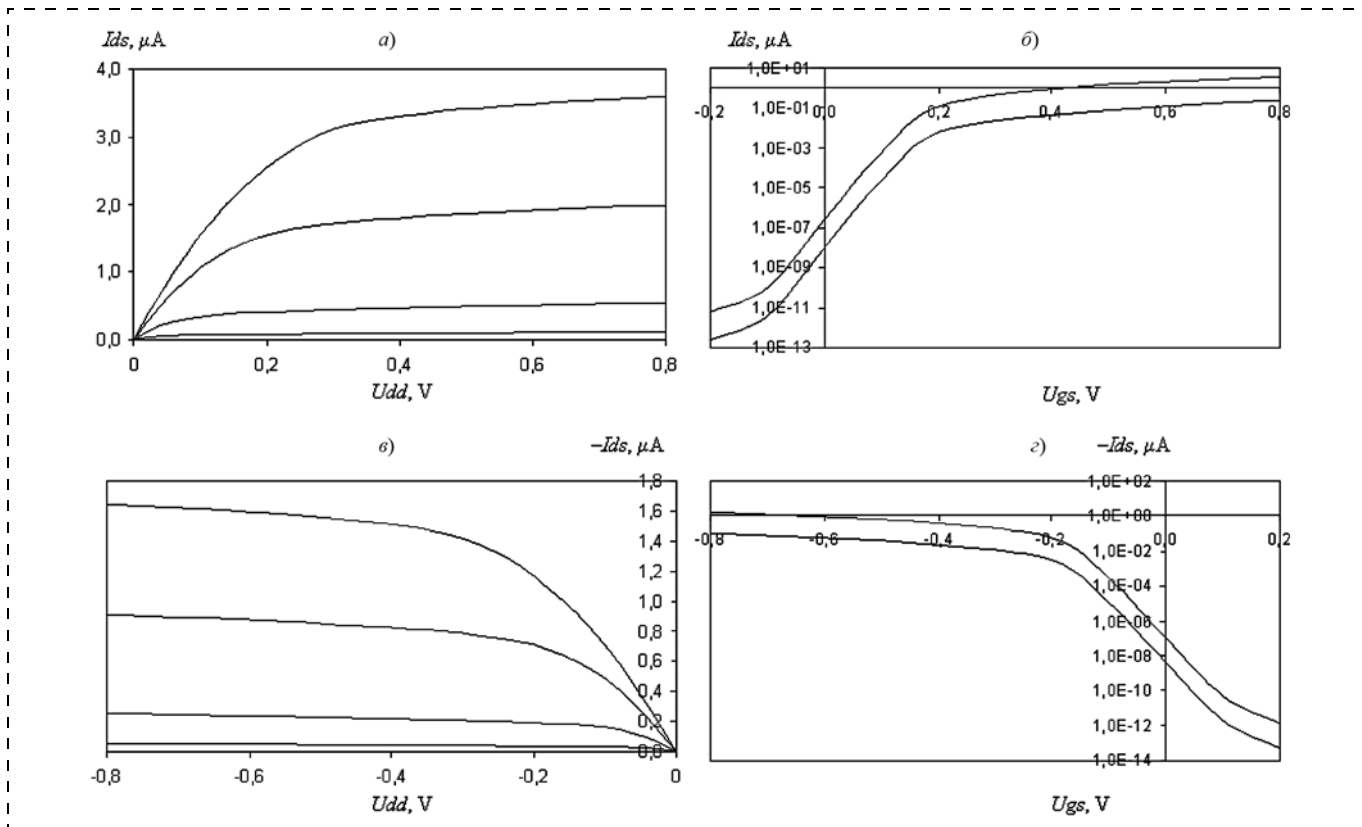
ная структура транзистора, центральное сечение которой представлено на рис. 1. Рабочая область транзистора представляет собой цилиндр кремния с диаметром рабочей области  $d_S$  с полностью охватывающим затвором и толщиной подзатворного диэлектрика  $t_{ox}$ . Рабочая область ограничена областями истока *S* и стока *D*. Вся конструкция размещена на КНИ-подложке.

Для кремниевого полевого КНИ КМОП-нанотранзистора с цилиндрической геометрией и полностью охватывающим затвором разработаны TCAD-модели *n*- и *p*-типов проводимостей. Рассматривали "планарный" и "вертикальный" варианты конструкции транзисторов с учетом поверхностной рекомбинации носителей заряда по механизму Шокли—Рида—Холла, высокой деградации полевой подвижности и без учета квантовых эффектов [12]. В наших расчетах диаметр  $d_S$  варьировался в диапазоне 6...12 нм, длина затвора  $L_g$  — 20...45 нм. Мы исключили эффект плавающей базы выбором  $d_S$  и концентрации легирования рабочей области  $N_A$ . Исходя из классического приближения треугольной потенциальной ямы [13], оценка значения  $d_S$  сверху для подавления эффекта плавающей базы определяется следующим соотношением:

$$d_S \leq \sqrt{\frac{6kT\epsilon_S}{q^2 N_A}},$$

где  $q$  — заряд электрона;  $k$  — константа Больцмана;  $T$  — температура;  $\epsilon_S$  — диэлектрическая проницаемость кремния. Тогда, например, при  $N_A = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  должно выполняться условие  $d_S < 8,3 \text{ нм}$ .

Из полученных результатов видна сильная зависимость характеристик транзистора от параметра  $d_S$ . Для исследуемых прототипов зависимость порогового напряжения  $U_{th}$  от  $d_S$  становится менее выпуклой, отличной от классической *roll-off* [14], в некоторых случаях наблюдали минимум на кривой  $U_{th}(d_S)$ . Это вызвано тем, что вклад поверхностного потенциала  $\phi_s$  в пороговое напряжение необходимо учитывать с весовым коэффициентом  $\lambda$ . Пока доминирует вклад общего обедненного заряда  $Q_b$ , пороговое напряжение уменьшается с уменьшением параметра  $d_S$ . Начиная с некоторого значения  $d_S$ , вклад  $Q_b$  в  $U_{th}$  становится незначительным. Поэтому пороговое напряжение, определяемое теперь уже значением  $\lambda\phi_s$ , возрастает с уменьшением  $d_S$  вследствие увеличения емкости рабочей области. Весовой коэффициент  $\lambda = 2 - C_{ox}/(1 + C_S/C_{ox})$  связан с емкостным взаимодействием прилегающих друг к другу обедненной рабочей области, емкость которой  $C_S$ , и подзатворного оксида, емкость которого  $C_{ox}$  [15].



**Рис. 2. ВАХ прототипов:**

*a* – *n*-тип ВАХ  $I_{ds}(U_{ds})$  при разных  $U_{gs}$  (снизу вверх) = 0,2 В, 0,4 В, 0,6 В, 0,8 В; *б* – *n*-тип ВАХ  $I_{ds}(U_{gs})$  при разных  $U_{ds}$  (снизу вверх) = 0,05 В, 0,8 В; *в* – *p*-тип ВАХ  $I_{ds}(U_{ds})$  при разных  $U_{gs}$  (снизу вверх) = -0,2 В, -0,4 В, -0,6 В, -0,8 В; *г* – *p*-тип ВАХ  $I_{ds}(U_{gs})$  при разных  $U_{ds}$  (снизу вверх) = -0,05 В, -0,8 В

Экстракция крутизны подпороговой характеристики  $S$  показывает, что она улучшается по мере уменьшения параметра  $d_S$ . При этом крутизна становится более чувствительной к изменению  $d_S$  при его малых значениях вследствие сложного поведения  $U_{th}$  с уменьшением  $d_S$ .

В общем случае значения ключевых параметров  $U_{th}$ ,  $S$ , токов  $I_{off}$  и  $I_{on}$  будут зависеть от времени жизни основных носителей заряда в рабочей области и на границах раздела Si/SiO<sub>2</sub> [16, 17]. Для подавления ККЭ необходимо организовать сток: для основных носителей заряда, уменьшив  $d_S$  до размера инверсионного слоя, тогда для дырок (электронов) в *n*-канальном (*p*-канальном) тран-

зисторе на истоковом переходе имеем практически нулевой потенциальный барьер (бесконечный сток) в области канала.

Для дальнейших рассуждений были выбраны следующие транзисторные прототипы с *n*- и *p*-проводимостями, основные технологические параметры которых представлены в таблице. Среди всех исследованных прототипов они имеют максимальное значение тока  $I_{on}$  при управляющих напряжениях 0,8 В, значением  $S$ , которое сопоставимо с другими прототипами и близко к идеальному.

Результаты моделирования ВАХ прототипов с топологическими параметрами из табл. 1, в диапазоне управляющих напряжений от 0 до 0,8 В представлены на рис. 2.

Следует отметить, что отношения  $I_{on}/I_{off}$  для транзисторов с разными проводимостями практически не отличаются друг от друга и с изменением напряжения питания синхронно следуют за этим изменением.

## 2. Характеристики переключений инвертора

С помощью математического ядра программы HSPICE [18] и с использованием схемотехнической модели цилиндрического с полностью охватывающим затвором КНИ КМОП-транзистора про-

### Параметры прототипа транзистора

(через "/" указаны значения для *n*- и *p*-типов проводимостей)

Параметр	Значение
$L_g$ , нм	22
$t_{ox}$ , нм	1,2
$d_S$ , нм	6,8
$N_{da}$ , см <sup>-3</sup>	$5,0 \times 10^{20}$
$N_A$ , см <sup>-3</sup>	$1,5 \times 10^{16}$
$U_{th}$ , мВ	120/-140
$I_{on}$ , мкА	3,60/-1,64
$I_{off}$ , пА	0,26/-0,12



моделировано распространение высокочастотного логического сигнала через инвертор на выбранных выше прототипах. Модель разработана в соответствии с апробированной методикой, рассмотренной в работе [19].

Эскиз размещения транзисторов представлен на рис. 3.

Результаты моделирования переключения инвертора при управляющих напряжениях  $U_{dd} = U_{in} = 0,8$  В и тактовой частоте 50 ГГц представлены на рис. 4.

Следует отметить, что задержки  $\tau_{in}$  и  $\tau_{out}$ , где  $\tau_{in}$  и  $\tau_{out}$  временные задержки нарастания и спада сигнала, соответственно, отличаются друг от друга. Экстрагированные значения задержки и мощности (активной и статической) составляют:  $\tau_{in}/\tau_{out} = 3,3/1,6$  пс;  $P = 1,1$  мкВт;  $P_{стат} = 0,3$  пВт. Следует отметить, что вследствие эффекта насыщения ВАХ зависимости  $I_{ds}(U_{ds})$  являются нелинейными. Поэтому зависимость  $U_{out}(U_{in})$  будет также нелинейной. Качественно острота передаточной характеристики является мерой того, насколько хорошо данная цепь может выполнять цифровые операции.

На рис. 5 приведена полученная из результатов расчетов зависимость  $\tau(U_{dd})$ .

В данном случае в диапазоне 0,8...0,62 В задержка пропорционально возрастает с уменьшением  $U_{dd}$ . Крутизна этого участка определяется пара-

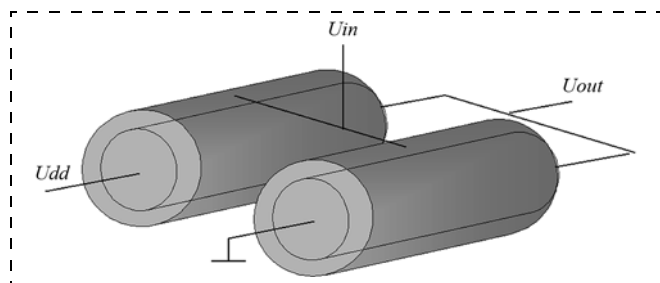


Рис. 3. Эскиз инвертора

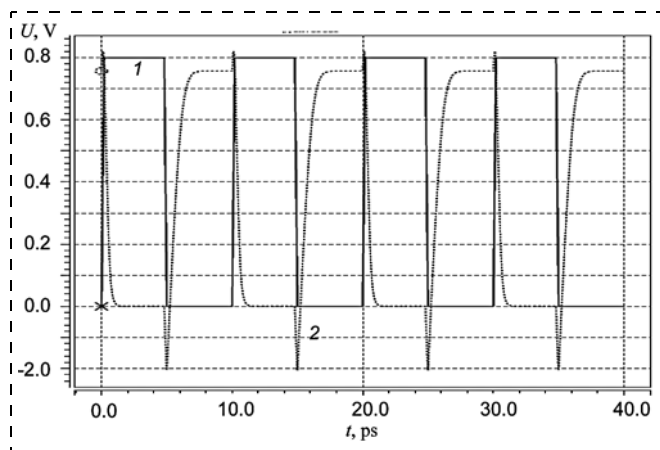


Рис. 4. Динамическая характеристика инвертора: 1 — тактовый (входной) сигнал; 2 — отклик инвертора

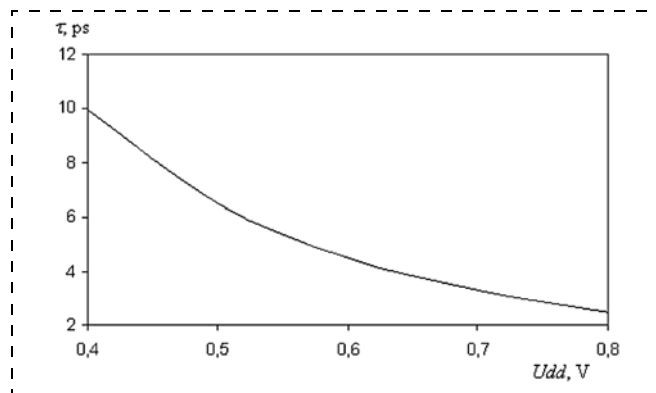


Рис. 5. Зависимость  $\tau(U_{dd})$

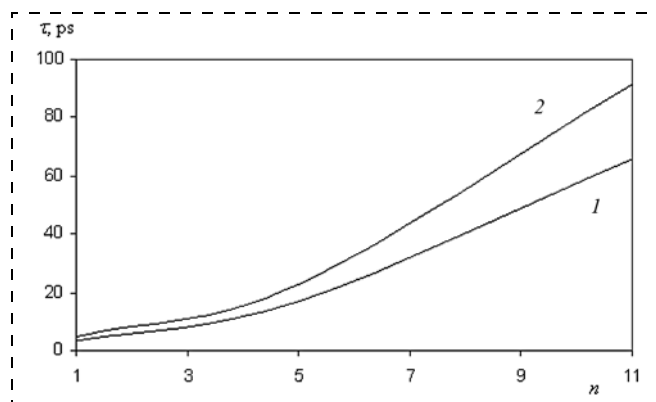


Рис. 6. Зависимость  $\tau(n)$  при разных  $U_{dd}$  и тактовой частоте 50 ГГц: 1 —  $U_{dd} = 0,8$  В; 2 —  $U_{dd} = 0,68$  В

метрами  $\lambda$  и  $S$ . При фиксированном напряжении питания изменение задержки можно представить следующим образом:

$$\tau = \tau_0 \left( 1 - \lambda \left( \frac{U_{in} - U_{th}}{S} \ln 10 \right) \right). \quad (1)$$

Выражение (1) позволяет оценить влияние топологических и электрических параметров на задержку инвертора. Рост  $\lambda$  приводит к снижению крутизны линейного участка зависимости  $\tau(U_{dd})$ . Рост  $S$  приводит к увеличению крутизны и сокращению линейного участка.

По сложившейся методике оценка работоспособности логических цепей формируется на основе анализа распространения логического сигнала в цепочке большого нечетного числа идентичных инверторов. С помощью программы HSPICE промоделировано распространение логического сигнала через 11 инверторов, модель которого рассмотрена выше. На рис. 6 приведена полученная из результатов расчетов зависимость  $\tau(n)$ , где  $n$  — номер инвертора.

Результаты моделирования показывают, что зависимость  $\tau(n)$  является монотонной, что предопределяет устойчивую работоспособность сложных логических вентилей.

Совокупность двух факторов — наличие положительного участка в зависимости  $\tau(U_{dd})$  и общеизвестная тенденция снижения активной мощности при понижении  $U_{dd}$ , обуславливает наличие оптимального значения параметра  $\tau P$  при пониженном значении  $U_{dd}$  [9]. В настоящем случае минимальное значение  $\tau P$  соответствует  $U_{dd} = 0,68$  В;  $\tau P_{\min}$  примерно на 20 % меньше, чем при  $U_{dd} = 0,8$  В. Следует отметить, что зависимость  $\tau(\lambda, S)$  будет влиять на положение и "глубину" найденного минимума.

### 3. Характеристики сумматора по модулю 2

Логический элемент — сумматор по модулю 2 (XOR2) является основной составляющей частью полного сумматора. Он имеет два входа и один выход. Однако он не является однокаскадным в силу выполняемой им логической функции. Для реализации схемотехники сумматора с оптимальным произведением  $\tau P$  выбрана электрическая схема, приведенная на рис. 7.

В данном случае применение с полностью охватывающим затвором КНИ КМОП-нанотранзисторов приводит к уменьшению переключаемой емкости, что повышает быстродействие, а также к резкому сокращению занимаемой площади, что обуславливает снижение рассеиваемой мощности.

На основе схемотехнических моделей транзисторов и инверторов разработана схемотехническая модель сумматора, динамические характеристики которого были рассчитаны с помощью HSPICE. Типичная динамическая характеристика приведена на рис. 8. Здесь при  $U_{dd} = 0,8$  В, напряжении на входе 1 ( $U_{in1}$ ) на уровне "1" (0,8 В) напряжение на входе 2 ( $U_{in2}$ ) переключается из нуля в единицу (высокий уровень) и происходит переключение выхода ( $U_{out}$ ) на низкий уровень (ноль). Этот процесс происходит с тактовой частотой 50 ГГц. В зависимости от уровня на входах элемента уровень выхода поддерживается либо высокий, либо низкий. Наличие пиков связано с переходными процессами в схеме. Следует отметить, что максимальное значение пика напрямую зависит от зна-

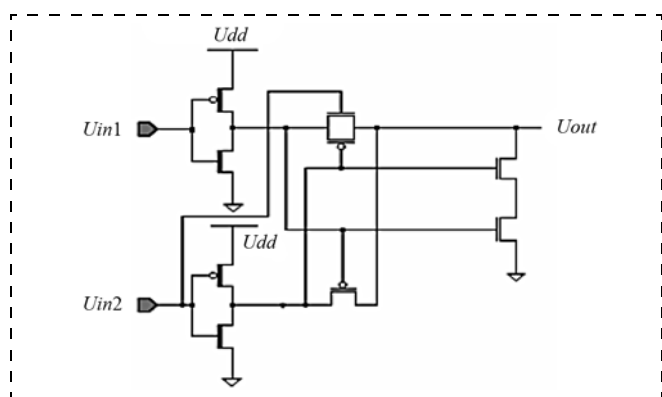


Рис. 7. Схема сумматора по модулю 2

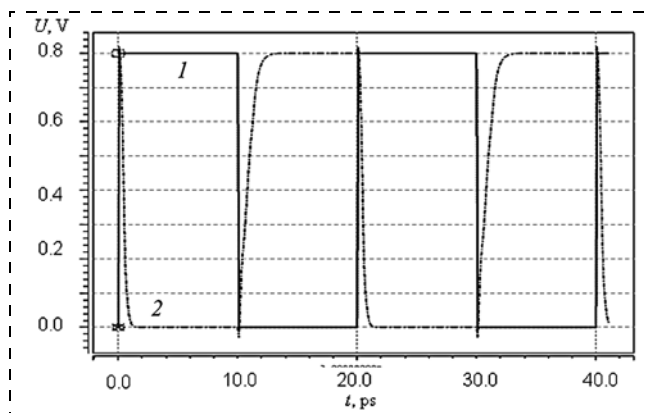


Рис. 8. Динамическая характеристика сумматора по модулю 2 при  $U_{dd} = 0,8$  В и тактовой частоте 50 ГГц:

1 —  $U_{in2}$ ; 2 —  $U_{out}$

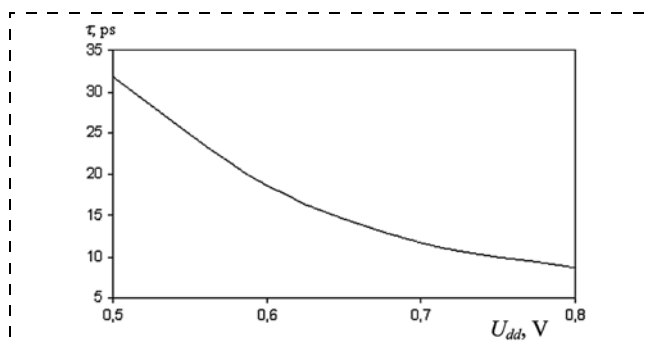


Рис. 9. Зависимость  $\tau(U_{dd})$

чения напряжения питания. При этом данная зависимость имеет почти линейный характер.

Основные характеристики сумматора при  $U_{dd} = 0,8$  В и тактовой частоте 50 ГГц следующие:  $\tau_{\min/\max} = 5/8,6$  пс;  $P = 4,9$  мкВт;  $(\tau P)_{\max} = \text{аДж}$ ;  $P_{\text{стат}} = 1,5$  пВт;  $I_{\text{off}} = 1,9$  пА.

Из анализа результатов моделирования характеристик сумматора при пониженном напряжении питания и фиксированной частоте можно сделать следующие выводы. Характерная зависимость задержки от напряжения питания имеет вид, приведенный на рис. 9.

Следует отметить характерную особенность поведения задержки. Есть диапазон напряжения питания, в котором задержка линейно зависит от  $U_{dd}$ . Крутизна этого наклона не зависит от частоты. В рассматриваемом случае это диапазон от 0,8...0,71 В и наклон характеристики равен 30 пс/В.

Следующий вывод состоит в том, что при снижении напряжения питания в некотором диапазоне (примерно  $U_{dd}/2$ ) активная мощность уменьшается практически линейно. Характерная зависимость приведена на рис. 10.

Наклон рассматриваемой характеристики существенно зависит от частоты. В представленном случае при 50 ГГц он составляет 12,5 мкВт/В, а при частоте 20 ГГц — 5 мкВт/В.

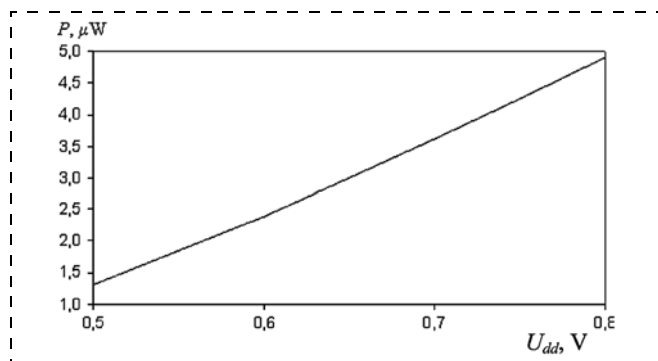


Рис. 10. Зависимость  $P(U_{dd})$

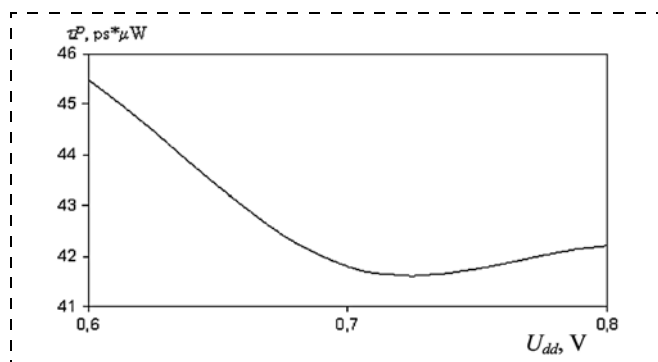


Рис. 11. Зависимость  $\tau P(U_{dd})$

Наличие приведенных выше условий позволяет сделать вывод от том, что существует оптимальное значение параметра  $\tau P$  при некоем значении  $U_{dd}$ . Характерная зависимость приведена на рис. 11.

Минимум анализируемого параметра достигается при напряжении питания 0,72 В. Следует отметить, что положение минимума не зависит от набора входных сигналов. В рассматриваемом случае максимальное время задержки 10,8 пс, активная мощность переключения 3,9 мкВт при частоте 50 ГГц. Проведенные расчеты позволяют сделать вывод, что данный элемент выполняет требуемую логическую операцию и сохраняет функциональную способность до напряжения питания 0,56 В.

## Заключение

В работе проанализирован один из возможных подходов разработки маломощной электроники на основе низковольтных логических вентилях, выполненных на цилиндрических КНИ КМОП-нанотранзисторах.

Разработаны TCAD-модели  $n$ - и  $p$ -типов проводимости рассматриваемых нанотранзисторов. По результатам математического моделирования выявлено аномальное поведение зависимости порогового напряжения от диаметра рабочей области, которое связано с особенностями проявления коротко-канальных эффектов вследствие емкостного

взаимодействия областей затвор-канал и сток-источковых переходов при малых длинах затвора. В этом случае с уменьшением диаметра снижается емкость перехода сток-исток, соответственно возрастает пороговое напряжение. Выбраны прототипы транзисторов с оптимальными параметрами для синтеза сложных логических вентилях с длиной затвора 22 нм, диаметром рабочей области 6,8 нм, с низким напряжением питания до 0,8 В.

С привлечением математического ядра программы HSPICE численно исследованы динамические характеристики разработанных физических моделей инвертора, цепочки инверторов и сумматора по модулю два. При управляющих напряжениях 0,8 В и частоте 50 ГГц модель инвертора предсказывает максимальную задержку переключения 3,3 пс, предельный уровень активной мощности 1,1 мкВт, статической 0,3 пВт, модель сумматора по модулю 2 предсказывает максимальную задержку переключения 8,6 пс, предельный уровень активной мощности 4,9 мкВт, статической мощности 1,5 пВт. Минимум произведения "задержка  $\times$  мощность переключения" сумматора будет при напряжении питания 0,72 В. Его положение не зависит от набора входных сигналов. При этом максимальная задержка переключения составляет 10,8 пс, предельный уровень активной мощности 3,9 мкВт.

Совокупность полученных характеристик позволяет рассматривать анализируемую транзисторную архитектуру для создания маломощных электронных устройств.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (Фундаментальные исследования 47 ГП) по теме № 0580-2021-0001 "Математическое обеспечение и инструментальные средства для моделирования, проектирования и разработки элементов сложных технических систем, программных комплексов и телекоммуникационных сетей в различных проблемно-ориентированных областях" (AAAA-A19-119011790077-1).*

## Список литературы

1. Colinge J.-P. FinFETs and Other Multi-Gate Transistor. New York: Springer-Verlag, 2008.
2. Ferain I., Colinge C. A., Colinge J. Multigate transistors as the future of classical metal-oxide-semiconductor field-effect transistors // Nature. 2011. Vol. 479. P. 310–316.
3. Savio A., Monfray S., Charbuillet C., Skotnicki T. On the limitations of silicon for I-MOS integration // IEEE Transactions on Electron Devices. 2009. Vol. 56, N. 5. P. 1110–1117.
4. Schwierz F., Wong H., Liou J. J. Nanometer CMOS. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2010.
5. Sharma D., Vishvakarma S. K. Precise analytical model for short channel cylindrical gate (CylG) gate-all-around (GAA) MOSFET // Solid. State. Electron. 2013. Vol. 86, N. 1. P. 68–74.
6. Chiang K., Liou J. J. An analytical subthreshold current/swing model for junctionless cylindrical nanowire FETs

(JLNFETs) // Facta Universitatis Series: Electronics and Energetics. 2013. Vol. 26, N. 3. P. 157–173.

7. **Kim J., Sun W., Park S., Lim H., Shin H.** A compact model of gate-voltage-dependent quantum effects in short-channel surrounding-gate metal-oxide-semiconductor field-effect transistors // J. Semiconductor Technology and Science. 2011. Vol. 11, N. 4. P. 278–286.

8. **Масальский Н. В.** Моделирование характеристик КМОП нанотранзисторов с полностью охватывающим затвором и неравномерно легированной рабочей областью // Микроэлектроника. 2019. Т. 48, № 6. С. 452–459.

9. **Красиков Г. Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов. М.: Технофера, 2002.

10. **Amara A., Rozeau O.** Planar double-gate transistor. Springer, 2009.

11. **ISE TCAD.** Release 10: User's manual. Zurich, 2004.

12. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984.

13. **Mudanai S., Chindalore G., Shih W.-K., Wang H., Ouyang Q., Tasch A. F., Maziar C., Benerjee S.** Models for electron and hole mobilities in MOS accumulation layers // IEEE Trans. Electron Device. 1999. Vol. 46. P. 1749–1759.

14. **Suh C.** Two-dimensional analytical model for deriving the threshold voltage of a short channel fully depleted cylindrical/surrounding gate MOSFET // J. Semiconductor Technology and Science. 2011. Vol. 11, N. 2. P. 111–120.

15. **Sinha S. K., Chaudhury S.** Impact of oxide thickness on gate capacitance — a comprehensive analysis on MOSFET, nanowire FET and CNTFET devices. IEEE Trans Nanotechnol. 12 (6) 2013.

16. **Goel K., Saxena M., Gupta M. R. S., Gupta R. S.** Modeling and simulation of a nanoscale three-region tri-material gate stack (TRIMGAS) MOSFET for improved carrier transport efficiency and reduced hot electron effects // IEEE Trans. Electron Devices. 2006. Vol. 53, N. 7. P. 1623–1633.

17. **Zhang L., Ma C., He J., Lin X., Chan M.** Analytical solution of subthreshold channel potential of gate underlap cylindrical gate-all-around MOSFET // Solid. State. Electron. 2010. Vol. 54, N. 8. P. 806–808.

18. **URL:** <https://www.stanford.edu/class/ee101b/hspice.html>/ Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (дата обращения 15.03.2020).

19. **Масальский Н. В.** Логические вентили на двухзатворных КНИ КМОП нанотранзисторах с неравномерно легированным каналом // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 8. С. 481–490.

---

**N. V. Masalsky**, Ph. D., Leading Researcher,  
Federal State institution "Federal Scientific Center Research Institute of System Researches of the Russian Academy of Sciences", e-mail: volkov@niisi.ras.ru

*Corresponding author:*

**Masalsky Nicolay V.**, Ph. D., Leading Researcher, Federal State institution "Federal Scientific Center Research Institute of System Researches of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russian Federation, e-mail: volkov@niisi.ras.ru

## Synthesis of Low-Voltage Logic Gates on Surrounding Gate SOI CMOS Nanotransistors

*Receiver on  
Accepted on*

*We discuss the issues of synthesis of low-voltage logic gates on cylindrical surrounding gate SOI CMOS nanotransistors in the supply voltage range up to 0.8 V. In this transistor architecture, it becomes possible to more effectively control the charge in its working area, primarily due to its design parameters. It is also characterized by effective suppression of short-channel effects and a low capacitance value. This leads to a decrease in the level of power dissipation in combination with a reduction in the occupied area. TCAD models of n- and p-types nanotransistors have been developed. The anomalous behavior of the dependence of the threshold voltage on the diameter of the working area is revealed, which is associated with the peculiarities of the manifestation of short-channel effects due to the capacitive interaction of the gate-channel regions and drain-source transitions at small gate lengths. They were used to select prototypes of transistors with optimal parameters for the synthesis of complex logic gates with low supply voltage.*

*Using the mathematical core of the HSPICE program, the dynamic characteristics of the developed physical models of the inverter, the inverter chain, and the XOR2 are numerically investigated. At control voltages of 0.8 V and a frequency of 50 GHz, the inverter model predicts a maximum switching delay of 3.3 ps, a limit level of active power of 1.1 mW, static 0.3 pW, the XOR2 predicts a maximum switching delay of 8.6 ps, a limit level of active power of 4.9 mW, static 1.5 pW. The minimum of the product "delay \* power" of the adder is at a supply voltage of 0.72 V. Its position does not depend on the set of input signals. At the same time, the maximum switching delay is 10.8 ps, the maximum active power level is 3.9 mW.*

*The totality of the obtained characteristics allows us to consider the analyzed transistor architecture for creating low-power electronic devices.*

**Keywords:** "silicon on insulator" technology, cylindrical surrounding gate SOI CMOS nanotransistor, logic gate, low supply voltage

*For citation:*

**Masalsky N. V.** Synthesis of Low-Voltage Logic Gates on Surrounding Gate SOI CMOS Nanotransistors, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 75–82.

DOI: 10.17587/nmst.23.75-82



## Reference

1. **Colinge J.-P.** Fin FETs and Other Multi-Gate Transistor. New York, Springer-Verlag, 2008.
2. **Ferain I., Colinge C. A., Colinge J.** Multigate transistors as the future of classical metal—oxide—semiconductor field-effect transistors, *Nature*, 2011, vol. 479, pp. 310—316.
3. **Savio A., Monfray S., Charbuillet C., Skotnicki T.** On the limitations of silicon for I-MOS integration, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, vol. 56, no. 5, pp. 1110—1117.
4. **Schwierz F., Wong H., Liou J. J.** Nanometer CMOS. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2010.
5. **Sharma D., Vishvakarma S. K.** Precise analytical model for short channel cylindrical gate (CylG) gate-all-around (GAA) MOSFET, *Solid. State. Electron.*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 68—74.
6. **Chiang K., Liou J. J.** An analytical subthreshold current/swing model for junctionless cylindrical nanowire FETs (JL CNFETs). *Facta Universitatis Series: Electronics and Energetics*, 2013, vol. 26, no. 3, pp. 157—173.
7. **Kim J., Sun W., Park S., Lim H., Shin H.** A compact model of gate-voltage-dependent quantum effects in short-channel surrounding-gate metal-oxide-semiconductor field-effect transistors, *J. Semiconductor Technology and Science*, 2011, vol. 11, no. 4, pp. 278—286.
8. **Masal'skii N. V.** Modeling the CMOS characteristics of a completely depleted surrounding gate nanotransistor and an unevenly doped working region, *Russian Mikroelektronika*, 2019, vol. 48, no. 6, pp. 394—401.
9. **Krasikov G. J.** Konstruktivno-tekhnologicheskie osobennosti submicronnix MOP tranzistiov. Moscow, Tekhnosfera, 2002 (in Russian).
10. **Amara A., Rozeau O.** Planar double-gate transistor. Springer, 2009.
11. **ISE TCAD.** Release 10: User's manual. Zurich, 2004.
12. **Sze S. M.** Physics of semiconductor devices. A Wiley-Interscience Publication, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1981.
13. **Mudanai S., Chindalore G., Shih W.-K., Wang H., Ouyang Q., Tasch A. F., Maziar C., Benerjee S.** Models for electron and hole mobilities in MOS accumulation layers, *IEEE Trans. Electron Device*, 1999, vol. 46, pp. 1749—1759.
14. **Suh C.** Two-dimensional analytical model for deriving the threshold voltage of a short channel fully depleted cylindrical/surrounding gate MOSFET, *J. Semiconductor Technology and Science*, 2011, vol. 11, no. 2, pp. 111—120.
15. **Sinha S. K., Chaudhury S.** Impact of oxide thickness on gate capacitance — a comprehensive analysis on MOSFET, nanowire FET and CNTFET devices, *IEEE Trans Nanotechnol.*, 2013. 12 (6).
16. **Goel K., Saxena M., Gupta M. R. S., Gupta R. S.** Modeling and simulation of a nanoscale three-region tri-material gate stack (TRIMGAS) MOSFET for improved carrier transport efficiency and reduced hot electron effects, *IEEE Trans. Electron Devices*, 2006, vol. 53, no. 7, pp. 1623—1633.
17. **Zhang L., Ma C., He J., Lin X., Chan M.** Analytical solution of subthreshold channel potential of gate underlap cylindrical gate-all-around MOSFET, *Solid. State. Electron.*, 2010, vol. 54, no. 8, pp. 806—808.
18. **URL:** <https://www.stanford.edu/class/ee101b/hspice.html>/ Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (data access 15.03.2020).
19. **Masalsky N. V.** Logical gates on double gate SOI CMOS nanotransistors with the non-uniform doping channel, *Nano- i mikrosystemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 8, pp. 481—490 (in Russian).

УДК 621.382.323

DOI: 10.17587/nmst.23.82-87

**Д. С. Пономарев**, канд. физ.-мат. наук, доц., зам. директора, вед. науч. сотр.,  
e-mail: [ponomarev\\_dmitr@mail.ru](mailto:ponomarev_dmitr@mail.ru)

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

## ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ФОТОПРОВОДЯЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Поступила в редакцию 05.02.2021

Предложены и разработаны сверхрешеточные гетероструктуры *InAlAs/InGaAs* с ультракороткими временами жизни фотовозбужденных носителей заряда, на основе которых спроектированы и изготовлены фотопроводящие антенно-генераторы широкополосного излучения терагерцового (ТГц) диапазона частот с шириной спектра 10 ГГц — 3,0 ТГц и динамическим диапазоном более 60 дБ. Показана эффективность использования периодических металлических (плазмонных) электродов, симметрично расположенных в 10-микронном зазоре антенны, для увеличения излучаемой ТГц мощности вплоть до 10 мкВт (при напряжении смещения 20...30 В и средней мощности лазерной накачки 10 мВт). Благодаря полученным параметрам разработанные антенны могут использоваться для создания отечественных систем ТГц спектроскопии и визуализации высокого разрешения.

**Ключевые слова:** источники терагерцового излучения, фотопроводящие антенны, терагерцовая частота

### Введение

На данный момент для генерации излучения терагерцового (ТГц) диапазона используются различные устройства, отличающиеся по рабочему

диапазону частот, ширине излучаемого спектра, значением средней и пиковой мощности. Генераторы, использующие излучение лазера (оптико-ТГц устройства), позволяют получать и импульсное, и

непрерывное излучение во всем ТГц диапазоне [1–3]. Благодаря широкому частотному диапазону работы, компактности и доступности оптико-ТГц преобразователей, сегодня они являются очень популярными и распространенными.

Можно выделить особый класс оптико-ТГц преобразователей — устройства на основе фемтосекундных лазеров. Их особенностью является предельно малая длительность импульсов генерируемого ТГц излучения. Эти импульсы представляют собой всего одну — две осцилляции ТГц поля и имеют предельно широкий спектр, что существенно отличает их от других типов генераторов ТГц диапазона.

При малой длительности лазерного импульса оптико-ТГц устройства позволяют в принципе получать ТГц импульсы со спектром, перекрывающим весь ТГц диапазон.

Другим важным фактором в применении фемтосекундной лазерной техники для исследований в ТГц диапазоне являются разработанные чувствительные оптические методы детектирования ТГц импульсов с временным разрешением (Terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS) [4, 5], которые позволяют проводить измерения амплитудных и фазовых характеристик ТГц импульсов.

Можно выделить два основных физических принципа генерации ТГц излучения с помощью фемтосекундных лазеров. В первом случае лазерный импульс взаимодействует с электрооптической средой с квадратичной нелинейностью, в которой наблюдается оптическое выпрямление (нелинейный эффект второго порядка) [6]. Во втором случае лазерный импульс возбуждает импульс электрического тока, и генерация ТГц излучения осуществляется за счет движения электронов, находящихся в зоне проводимости [7]. Таким образом, в этом случае эффективное возбуждение импульса тока с соответствующими частотно-временными характеристиками является принципиальным условием для эффективной генерации ТГц излучения. В настоящей работе рассмотрен только второй способ.

Традиционно в качестве фотопроводящего материала для работы с излучением титан-сапфировых лазеров с несущей длиной волны 780...800 нм используется выращенный методом молекулярно-лучевой эпитаксии при пониженной температуре GaAs (LT GaAs — low temperature grown GaAs) [1, 2]. Данный материал обладает высоким сопротивлением, позволяющим прикладывать большие электрические поля к электродам антенны, достаточно хорошей подвижностью и малым временем жизни носителей заряда. Высокое сопротивление материала обеспечивается во многом благодаря широкой запрещенной зоне полупроводника. При этом широкая запрещенная зона GaAs не позволяет рабо-

тать с длинноволновой накачкой, генерируемой компактными и недорогими волоконными лазерами. Для работы с излучением этих лазеров необходимы фотопроводники с более узкой запрещенной зоной. В отличие от широко используемого LT-GaAs, фотопроводник InGaAs позволяет работать с более длинноволновой оптической накачкой в диапазоне 1,0...1,6 мкм [2, 8–10], излучаемой волоконными лазерными системами или лазерами на неодимовом стекле, подходящими для реализации недорогих и компактных ТГц устройств. Для эффективной генерации ТГц излучения требуется, чтобы фотопроводящий слой имел высокое сопротивление. Поскольку InGaAs изначально имеет малое сопротивление и большое время жизни фотовозбужденных носителей заряда, разрабатываются различные подходы для увеличения его сопротивления: ионная имплантация [2], низкотемпературный рост с легированием атомами бериллия [11], решеточно-согласованные [12] и напряженные сверхрешеточные гетероструктуры [13].

В настоящей работе приведен краткий обзор современного состояния отечественной элементной базы фотопроводящих ТГц устройств на основе полупроводниковых соединений A3B5 с анализом спектральных и мощностных характеристик разработанных генераторов широкополосного ТГц излучения на основе сверхрешеточных гетероструктур InGaAs/InAlAs.

### **Материальная база для создания фотопроводящих генераторов ТГц излучения**

В качестве базового материала для изготовления фотопроводящих генераторов ТГц излучения использовали сверхрешеточные гетероструктуры InGaAs/InAlAs, выращенные в ИСВЧПЭ РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии (установка Riber 32P) на подложках полуизолирующего GaAs. В работах [14, 15] подробно описаны режимы роста толщины слоев выращенных гетероструктур. В настоящей работе мы ограничимся рассмотрением двух топологий фотопроводящих генераторов ТГц излучения — фотопроводящих антенн (ФПА) с традиционной металлизацией и с металлическими (плазмонными) электродами.

Изготовление плазмонной ФПА осуществлялось в два этапа. Топология обычной и плазмонной ФПА была выбрана таким образом, чтобы зазор между электродами был одинаков для обеих антенн. На первом этапе проводили формирование верхней металлизации антенны. Для этого на поверхность сверхрешетки был нанесен слой пассивирующего диэлектрика Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Далее выполняли экспонирование окон методом контактной фото-

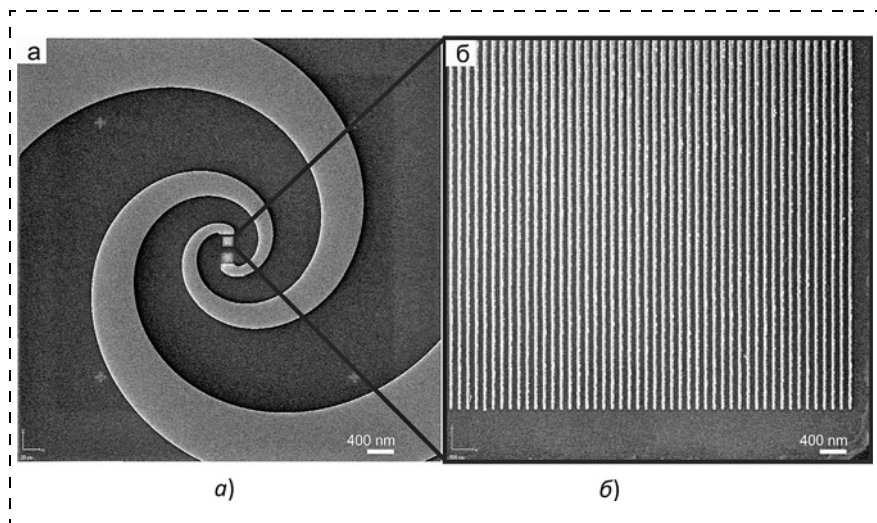


Рис. 1. Схематичное изображение ФПА со спиральной топологией (а) со встроенными плазмонными решетками и увеличенное изображение решетки (б)

литографии на установке *SUSS MJB4* и проявление экспонированного рисунка. После этого проводили жидкостное травление  $\text{Si}_3\text{N}_4$  по сформированному рисунку в буферном травителе HF. В самом конце осуществляли напыление системы металлов Ti/Au толщиной 50/450 нм, а лишний металл удаляли методом "взрыва" (*lift-off*). На втором этапе проводили формирование плазмонных электродов с помощью электронно-лучевого литографа *Raith Voyager*, с последующим напылением системы металлов Ti/Au толщиной 18/82 нм соответственно; в конце процесса лишний металл удаляли с помощью метода *lift-off*. В сформированной плазмонной решетке (периодической системе плазмонных электродов) ширина одного электрода и зазор между двумя соседними электродами составили 100 нм. На рис. 1 приведен общий вид образца ФПА со спиральной топологией (а) со встроенными плазмонными решетками и увеличенное изображение решетки (б).

### Экспериментальная база.

#### Спектральные и мощностные характеристики фотопроводящих генераторов ТГц излучения

Исследование образцов ФПА при разных значениях мощности лазерного излучения проводили с помощью оригинального лабораторного импульсного ТГц спектрометра, разработанного в ИОФ РАН [16, 17] и показанного на рис. 2. Источником излучения в спектрометре служила исследуемая ФПА, к которой прикладывали переменное напряжение смещения с регулируемой в диапазоне 1...100 В амплитудой и частотой повторения прямоугольных импульсов 20 кГц. Приемником в экспериментах служила коммерческая ФПА на основе

LT GaAs TERRA-8 (производство *Menlo Systems*, Германия). Возникающий в приемнике токовый сигнал усиливался малошумящим усилителем, а затем синхронно выпрямлялся. Источником ультракоротких оптических импульсов служил волоконный лазер с удвоением частоты выходного излучения EFOA-SH (производство "Авеста-Проект", Россия): центральная длина волны 780 нм, частота повторения импульсов 65 МГц, длительность импульсов ~100 фс. Среднюю мощность лазерного излучения в пучке накачки и в пучке зондирования можно было ва-

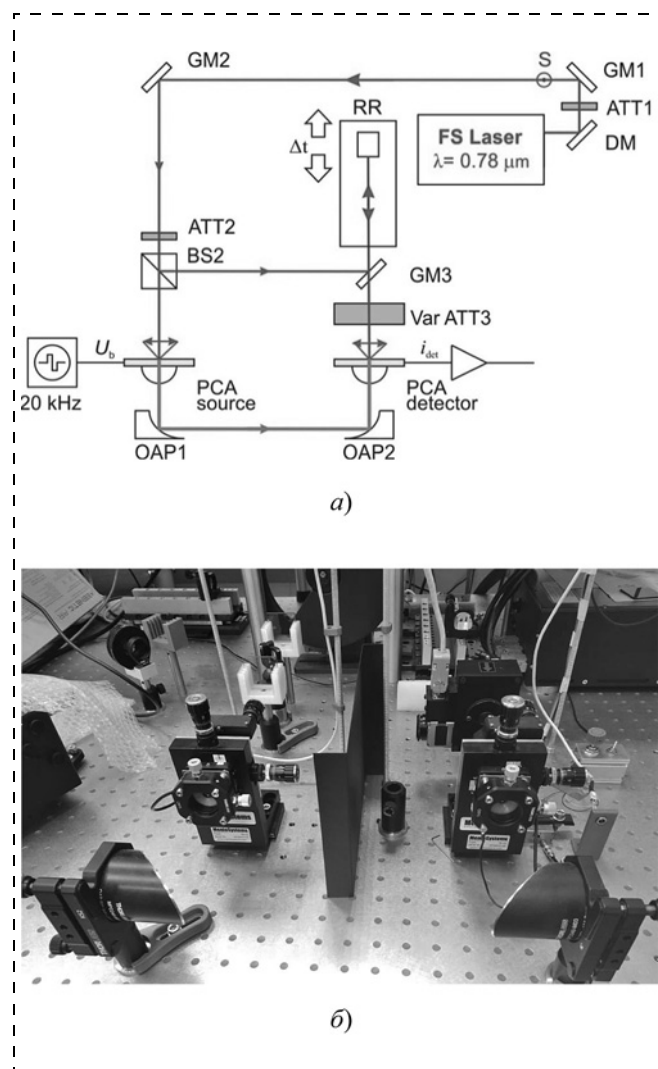


Рис. 2. Схема установки лабораторного импульсного широкополосного ТГц спектрометра, разработанного совместно ИОФ РАН и ИСВЧПЭ РАН:

а — оптическая схема; б — внешний вид

рировать регулируемым ослабителем в пределах  $P_{\text{opt}} = 0,3...20,0$  мВт. Для согласования ФПА-источника излучения и ФПА-детектора со свободным пространством были использованы гиперполусферические кремниевые линзы диаметром 12 мм и высотой 7,1 мм (производство *Batop*, Германия); сбор и транспортировку ТГц излучения осуществляли внеосевые параболические зеркала диаметром 2 дюйма и фокусным расстоянием 4 дюйма. На каждую зарегистрированную волновую форму импульсного сигнала накладывалась оконная функция Гьюки, выполнялось преобразование Фурье, в конце полученные спектры фазы и плотности мощности усредняли по 20 измерениям. Суммарное время регистрации спектра излучения с частотным разрешением  $\sim 0,02$  ТГц для спектрометра составляло  $\sim 20$  с, что было достигнуто в том числе использованием в линии оптической задержки быстродействующей 150-миллиметровой подвижки с линейным приводом (производство *Daedal Parker*, США).

Измерения интегральной мощности ТГц излучения  $P_{\text{THz}}$  выполняли с помощью абсолютно-калиброванной ячейки Голея, устанавливаемой в непосредственной близости от согласующей кремниевой линзы исследуемого образца ФПА. В силу низкого быстродействия ячейки Голея в данных измерениях лазерное излучение в пучке накачки модулировал механический прерыватель с частотой 23 Гц. Эффективности оптико-ТГц преобразования в образцах ФПА рассчитывали по результатам измерения интегральных мощностей излучения согласно выражению:  $\eta = P_{\text{THz}}/P_{\text{opt}}$ .

Примеры спектров ТГц генерации для исследуемых образцов ФПА приведены на рис. 3 (см. четвертую сторону обложки).

При одинаковом напряжении смещения сигналы от образцов ФПА с традиционной топологией оказались существенно слабее плазмонных, для их регистрации использовались напряжения  $\geq 20$  В. Видно, что спектральная плотность мощности излучения для ФПА с плазмонной решеткой (рис. 3, б, см. четвертую сторону обложки) и для ФПА с традиционной топологией (см. рис. 3, а) распределена в широком диапазоне частот (полоса 10 ТГц...2,5 ТГц) и превышает уровень шумов спектрометра вплоть до 2,5...3,0 ТГц. Особенностью ФПА с плазмонной решеткой является значительный прирост мощности в низкочастотной области спектра до 0,5 ТГц. Следует отметить, что ФПА с традиционной топологией демонстрируют спад высокочастотного края спектра при снижении средней мощности лазерного излучения, в то время как для плазмонной ФПА форма спектров не зависит ни от приложенного напряжения смещения, ни от средней мощности лазерного излучения.

Отметим, что несмотря на малое значение ширины запрещенной зоны  $\sim 0,9$  эВ для фотопроводящих слоев  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ , при традиционной топологии электродов пробой ФПА не наступает вплоть до 60 В (напряженность поля 60 кВ/см), при этом генерируемый антенной фототок достигает значений  $\sim 1$  мА [15]. Формирование плазмонной решетки приводит к тому, что распределение напряженности электрического поля в зазоре становится неоднородным, поэтому пробой антенны даже без лазерной накачки может наступить уже в пределах 30 В.

Зависимости интегральных мощностей ТГц излучения ФПА  $P_{\text{THz}}$  и эффективностей оптико-ТГц преобразования  $\eta$  в исследуемых образцах ФПА от приложенного напряжения смещения и  $P_{\text{opt}}$  приведены на рис. 4 и 5 соответственно (см. четвертую сторону обложки).

Известно [14, 15], что максимальная интегральная мощность ТГц излучения ФПА ограничена запасенной в зазоре антенны энергией. Для оценок, пренебрегая влиянием согласования импедансов фотопроводника и антенны на передачу мощности в антенну, можно считать  $P_{\text{max}} \approx (U_b^2/R_a)f_L\tau_{\text{THz}}$ , где полная длительность ТГц сигнала  $\tau_{\text{THz}} \approx 3R_aC_a \approx 1$  пс;  $R_a$  — действительная часть импеданса антенны для частот до  $\sim 1,5...2,0$  ТГц;  $C_a$  — емкость зазора антенны;  $U_b$  — напряжение смещения. Соответственно, для типичных значений  $U_b = 10$  В и  $R_a = 70$  Ом,  $P_{\text{max}} \approx 400$  мкВт. Зарегистрированные во всех экспериментах значения интегральной мощности находятся на уровне 10 мкВт ( $P_{\text{THz}} \ll P_{\text{max}}$ ), т. е., несмотря на значительность среднего фототока  $\sim 1$  мА, измерения проводят в режиме слабой лазерной накачки. Из рис. 4, б видно, что для ФПА с традиционной топологией  $P_{\text{THz}} \approx P_{\text{opt}}^n \approx P_{\text{opt}}$ . Снижение показателя степенной зависимости  $n$  интегральной ТГц мощности от мощности лазерной накачки (в нашем случае до  $n = 1$ ) по сравнению с ожидаемым из общих соображений значением  $n = 2$  является следствием эффектов насыщения [15]. В случае сверхрешечных гетероструктур, вероятно, играет роль насыщение центров захвата фотовозбужденных носителей заряда в барьерных слоях  $\text{InAlAs}$ , обеспечивающих пикосекундные времена жизни в слоях  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ .

Сравнивая результаты ТГц измерений для ФПА с традиционной топологией и плазмонной решеткой, приведенные на рис. 5, можно отметить, что при одинаковом приложенном напряжении эффективность конверсии и интегральная мощность излучения для плазмонной ФПА всегда оказываются больше, хотя меньшую эффективность конверсии в ФПА с традиционной топологией можно в некоторой степени скомпенсировать увеличени-



ем приложенного к электродам антенны напряжения смещения. Электрический пробой объемного  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  наступает при напряженностях поля  $\sim 200$  кВ/см (напряжение смещения  $\sim 200$  В), однако на практике достичь даже трети этого значения не удается ввиду быстрого нарастания темнового тока в антенне.

## Заключение

В работе предложены и разработаны сверхрешеточные гетероструктуры  $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}$  с ультракороткими временами жизни фотовозбужденных носителей заряда, на основе которых были спроектированы фотопроводящие антенны-генераторы широкополосного излучения терагерцового диапазона частот с шириной спектра 10 ГГц...3,0 ТГц и динамическим диапазоном более 60 дБ. Показана эффективность использования плазмонных электродов, расположенных в зазоре антенны, для увеличения излучаемой ТГц мощности (вплоть до 10 мкВт при напряжении смещения 20...30 В и средней мощности лазерной накачки 10 мВт) и эффективности оптико-ТГц конверсии в разработанных антеннах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-79-10195.*

## Список литературы

1. Yachmenev A. E., Lavrukhin D. V., Glinskiy I. A., Zenchenko N. V., Goncharov Y. G., Spektor I. E., Khabibullin R. A., Otsuji T., Ponomarev D. S. Metallic and dielectric metasurfaces in photoconductive terahertz devices: A review // *Optical Engineering*. 2019. Vol. 59. Is. 6. P. 061608.
2. Yachmenev A. E., Pushkarev S. S., Reznik R. R., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S. Arsenides-and related III-V materials-based multilayered structures for terahertz applications: Various designs and growth technology // *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2020. Vol. 66. Is. 2. P. 100485.
3. Preu S., Döhler G. H., Malzer S., Wang L. J., Gossard A. C. Tunable, continuous-wave Terahertz photomixer sources and applications // *Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 109. P. 061301.
4. Smolyanskaya O. A., Chernomyrdin N. V., Konovko A. A., Zaytsev K. I., Ozheredov I. A., Cherkasova O. P., Nazarov M. M., Guilletti J.-P., Kozlova S. A., Kistenev Yu. V., Coutaz J.-L., Mounaix P., Vaks V. L., Son J.-H., Cheon H., Wallas V. P., Feldman Yu., Popov I., Tuchin V. V. Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids // *Progress in Quantum Electronics*. 2018. Vol. 62. P. 1–77.
5. Lee Y. S. Principles of Terahertz Science and Technology. Springer. 2009.

6. Ilyakov I. E., Kitaeva G. K., Shishkin B. V., Akhmedzhanov R. A. Electro-optic sampling of terahertz waves by laser pulses with an edge-cut spectrum in birefringent crystal // *Opt. Lett.* 2017. Vol. 42, N. 9. P. 1704.
7. Пономарев Д. С., Хабибуллин Р. А., Ячменев А. Э., Мальцев П. П., Грехов М. М., Иляков И. Е., Шишкин Б. В., Ахмеджанов Р. А. Генерация терагерцового излучения при облучении фемтосекундными лазерными импульсами  $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ , выращенного на подложке GaAs с метаморфным буферным слоем // *Физика и техника полупроводников*. 2017. Т. 51, Вып. 4. С. 535.
8. Kuznetsov K., Klochkov A., Leontyev A., Klimov E., Pushkarev S., Galiev G., Kitaeva G. Improved InGaAs and InGaAs/InAlAs photoconductive antennas based on (111)-oriented substrates // *Electronics*. 2020. Vol. 9. N. 3. P. 495.
9. Dietz R. J., Globisch B., Roehle H., Stanze D., Göbel T., Schell M. Influence and adjustment of carrier lifetimes in InGaAs/InAlAs photoconductive pulsed terahertz detectors: 6 THz bandwidth and 90 dB dynamic range // *Opt. Express*. 2014. Vol. 22. P. 19411.
10. Ospald F., Maryenko D., Klitzing K., Driscoll D. C., Hanson M. P., Lu H., Gossard A. C., Smet J. H. 1.55  $\mu\text{m}$  ultrafast photoconductive switches based on ErAs:InGaAs // *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 92. P. 131117.
11. Globisch B., Dietz R. J. B., Kohlhaas R. B., Göbel T., Schell M., Alcer D., Semtsiv M., Masselink W. T. Iron doped InGaAs: Competitive THz emitters and detectors fabricated from the same photoconductor // *Journal of Applied Physics*. 2017. Vol. 121. P. 053102.
12. Roehle H., Dietz R. J. B., Hensel H. J., Böttcher J., Künzel H., Stanze D., Schell M., Sartorius B. Next generation 1.5  $\mu\text{m}$  terahertz antennas: mesa-structuring of InGaAs/InAlAs photoconductive layers // *Optics Express* 2010. Vol. 18, N. 3. P. 2296–2301.
13. Ponomarev D. S., Gorodetsky A., Yachmenev A. E., Pushkarev S. S., Khabibullin R. A., Grekhov M. M., Zaytsev K. I., Khusyainov D. I., Buryakov A. M., Mishina E. D. Enhanced terahertz emission from strain-induced InGaAs/InAlAs superlattices // *Journal of Applied Physics*. 2019. Vol. 125, N. 15. P. 151605.
14. Лаврухин Д. В., Ячменев А. Э., Глинский И. А., Зенченко Н. В., Хабибуллин Р. А., Гончаров Ю. Г., Спектор И. Е., Зайцев К. И., Пономарев Д. С. Излучательная эффективность терагерцовых антенн с традиционной топологией и металлической метаповерхностью: сравнительный анализ // *Оптика и спектроскопия*. 2020. Т. 128. В. 7. С. 1012.
15. Лаврухин Д. В., Галиев Р. Р., Павлов А. Ю., Ячменев А. Э., Майтама М. В., Глинский И. А., Хабибуллин Р. А., Гончаров Ю. Г., Зайцев К. И., Пономарев Д. С. Плазмонные фотопроводящие антенны для систем терагерцовой импульсной спектроскопии и визуализации // *Оптика и спектроскопия*. 2019. Т. 126. В. 5. С. 663.
16. Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Glinskiy I. A., Khabibullin R. A., Goncharov Y. G., Ryzhii M., Otsuji T., Spector I. E., Shur M., Skorobogatiy M., Zaytsev K. I., Ponomarev D. S. Terahertz photoconductive emitter with dielectric-embedded high-aspect-ratio plasmonic grating for operation with low-power optical pumps // *AIP Advances*. 2019. Vol. 9. P. 015112.
17. Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Pavlov A. Yu., Khabibullin R. A., Goncharov Yu. G., Spektor I. E., Komandin G. A., Yurchenko S. O., Chernomyrdin N. V., Zaytsev K. I., Ponomarev D. S. Shaping the spectrum of terahertz photoconductive antenna by frequency-dependent impedance modulation // *Semicond. Sci. Technol.* 2019. Vol. 34, N. 3. P. 034005.

*Corresponding author:*

**Ponomarev Dmitry S.**, Ph. D., Deputy Director, Institute of Ultra-High-Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow, 117105, Russian Federation, e-mail: ponomarev\_dmitr@mail.ru

## Photoconductive Semiconductor-Based Optoelectronic Devices for Generation of Terahertz Radiation

Received on February 05, 2021

Accepted on February 12, 2021

*We report on the development and fabrication of a superlattice-based InAlAs/InGaAs heterostructure featuring an ultrashort photocarrier lifetime which has been used as a material base for a photoconductive antenna (PCA)-emitter with a frequency bandwidth of 10 GHz — 3.0 THz and dynamic range above 60 dB. We show an efficiency of plasmonic electrodes embedded into the 10 μm PCA's gap demonstrating the enhancement of the emitted THz power up to 10 μW (at bias voltage 20–30 V and average pump power 10 mW). The results could open a pathway towards the development of the Russian THz spectroscopic and imaging systems.*

**Keywords:** terahertz sources, photoconductive antenna, terahertz radiation

*For citation:*

**Ponomarev D. S.** Photoconductive Semiconductor-Based Optoelectronic Devices for Generation of Terahertz Radiation, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 82–87.

DOI: 10.17587/nmst.23.82-87

### References

1. Yachmenev A. E., Lavrukhin D. V., Glinskiy I. A., Zenchko N. V., Goncharov Y. G., Spektor I. E., Khabibullin R. A., Otsuji T., Ponomarev D. S. Metallic and dielectric metasurfaces in photoconductive terahertz devices: A review, *Optical Engineering*, 2019, vol. 59, is. 6, p. 061608.
2. Yachmenev A. E., Pushkarev S. S., Reznik R. R., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S. Arsenides-and related III–V materials-based multilayered structures for terahertz applications: Various designs and growth technology, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2020, vol. 66, is. 2, p. 100485.
3. Preu S., Döhler G. H., Malzer S., Wang L. J., Gossard A. C. Tunable, continuous-wave Terahertz photomixer sources and applications, *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 109, p. 061301.
4. Smolyanskaya O. A., Chernomyrdin N. V., Konovko A. A., Zaytsev K. I., Ozheredov I. A., Cherkasova O. P., Nazarov M. M., Guilleti J.-P., Kozlova S. A., Kistenev Yu. V., Coutaz J.-L., Mounaix P., Vaks V. L., Son J.-H., Cheon H., Wallas V. P., Feldman Yu., Popov I., Tuchin V. V. Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids, *Progress in Quantum Electronics*, 2018, vol. 62, pp. 1–77.
5. Lee Y. S. Principles of Terahertz Science and Technology, Springer, 2009.
6. Ilyakov I. E., Kitaeva G. K., Shishkin B. V., Akhmedzhanov R. A. Electro-optic sampling of terahertz waves by laser pulses with an edge-cut spectrum in birefringent crystal, *Opt. Lett.*, 2017, vol. 42, no. 9, p. 1704.
7. Ponomarev D. S., Khabibullin R. A., Yachmenev A. E., Maltsev P. P., Grekhov M. M., Ilyakov I. E., Shishkin B. V., Akhmedzhanov R. A. Terahertz Radiation in In<sub>0.38</sub>Ga<sub>0.62</sub>As Grown on a GaAs Wafer with a Metamorphic Buffer Layer under Femtosecond Laser Excitation, *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 4, p. 509.
8. Kuznetsov K., Klochkov A., Leontyev A., Klimov E., Pushkarev S., Galiev G., Kitaeva G. Improved InGaAs and InGaAs/InAlAs photoconductive antennas based on (111)-oriented substrates, *Electronics*, 2020, vol. 9, no. 3, p. 495.
9. Dietz R. J., Globisch B., Roehle H., Stanze D., Göbel T., Schell M. Influence and adjustment of carrier lifetimes in InGaAs/InAlAs photoconductive pulsed terahertz detectors: 6 THz bandwidth and 90 dB dynamic range, *Opt. Express*, 2014, vol. 22, p. 19411.
10. Ospald F., Maryenko D., Klitzing K., Driscoll D. C., Hanson M. P., Lu H., Gossard A. C., Smet J. H. 1.55 μm ultrafast photoconductive switches based on ErAs:InGaAs, *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 92, p. 131117.
11. Globisch B., Dietz R. J. B., Kohlhaas R. B., Göbel T., Schell M., Alcer D., Semtsiv M., Masselink W. T. Iron doped InGaAs: Competitive THz emitters and detectors fabricated from the same photoconductor, *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 121, p. 053102.
12. Roehle H., Dietz R. J. B., Hensel H. J., Böttcher J., Künzel H., Stanze D., Schell M., Sartorius B. Next generation 1.5 μm terahertz antennas: mesa-structuring of InGaAs/InAlAs photoconductive layers, *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 3, pp. 2296–2301.
13. Ponomarev D. S., Gorodetsky A., Yachmenev A. E., Pushkarev S. S., Khabibullin R. A., Grekhov M. M., Zaytsev K. I., Khusyainov D. I., Buryakov A. M., Mishina E. D. Enhanced terahertz emission from strain-induced InGaAs/InAlAs superlattices, *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 125, no. 15, p. 151605.
14. Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Glinskiy I. A., Zenchko N. V., Khabibullin R. A., Goncharov Yu. G., Spektor I. E., Zaytsev K. I., Ponomarev D. S. Emission Efficiency of Terahertz Antennas with Conventional Topology and Metal Metasurface: A Comparative Analysis, *Optics and Spectroscopy*, 2020, vol. 128, P. 1018.
15. Lavrukhin D. V., Galiev R. R., Pavlov A. Yu., Yachmenev A. E., Maytama M. V., Glinskiy I. A., Khabibullin R. A., Goncharov Yu. G., Zaytsev K. I., Ponomarev D. S. Plasmonic Photoconductive Antennas for Terahertz Pulsed Spectroscopy and Imaging Systems, *Optics and Spectroscopy*, 2019, vol. 126, P. 580.
16. Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Glinskiy I. A., Khabibullin R. A., Goncharov Y. G., Ryzhii M., Otsuji T., Spektor I. E., Shur M., Skorobogaty M., Zaytsev K. I., Ponomarev D. S. Terahertz photoconductive emitter with dielectric-embedded high-aspect-ratio plasmonic grating for operation with low-power optical pumps, *AIP Advances*, 2019, vol. 9, P. 015112.
17. Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Pavlov A. Yu., Khabibullin R. A., Goncharov Yu. G., Spektor I. E., Komandin G. A., Yurchenko S. O., Chernomyrdin N. V., Zaytsev K. I., Ponomarev D. S. Shaping the spectrum of terahertz photoconductive antenna by frequency-dependent impedance modulation, *Semicond. Sci. Technol.*, 2019, vol. 34, no. 3, P. 034005.

**А. П. Лисицкий**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., liant222@yandex.ru,  
**П. П. Мальцев**, д-р техн. наук, научный рук.<sup>1</sup>, зав. лаб.<sup>2</sup>, isvch@isvch.ru,  
**О. С. Матвеев**<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., unicfive@yandex.ru,  
**А. О. Михалев**<sup>1,2</sup>, мл. науч. сотр., инженер,  
**А. А. Трофимов**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, стар. науч. сотр., aa-trofimov@yandex.ru,  
**В. Р. Скрынский**<sup>2</sup>, ассистент, vlad\_skr@mail.ru

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

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

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПЛАНАРНЫХ ИЗЛУЧАЮЩИХ СИСТЕМ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН. МОНОПОЛИ И ДИПОЛИ. ОБЗОР

Поступила в редакцию 09.02.2021

*Проведена классификация антенн и антенных решеток миллиметрового диапазона длин волн. Приведены различные конструкторско-технологические базисы реализации антенн и их параметры.*

**Ключевые слова:** антенна, монополи, диполи, конструкторско-технологический базис, миллиметровый диапазон длин волн

Излучающие системы делятся на группы отдельных антенн и антенных решеток. Для разделения этих групп далее используются термины — излучатель и антенна. И излучатель, и антенна преобразуют энергию сигнала в электромагнитное излучение. В научной и патентной литературе устройство, состоящее из единичного излучателя, повсеместно именуется также антенной. Далее принято, что антенная решетка состоит из нескольких излучателей.

Прогресс технологии СВЧ полупроводниковых гетероструктурных монокристаллических интегральных схем (МИС) открыл возможности для создания массовых персональных средств связи и автомобильной локализации в полосах Ka-, V- и W-диапазонов. Антенны в данных полосах частот по габаритным размерам сравнимы с СВЧ МИС, что позволяет интегрировать их в микросборки "система в корпусе" или в "систему на кристалле", оптимальные для групповой технологии с автоматизированной сборкой.

Эти обстоятельства стимулировали дальнейшее развитие антенной техники: обеспечение требуе-

мой рабочей полосы и направленности при планарной конструкции с минимальными размерами и реализация интеграции антенн в состав микросборок. В данной работе описаны многообразные решения разработки антенн и интеграции их в микросборку, приведенные в публикациях и патентной литературе. Данные решения составляют конструкторско-технологические базисы излучателей, пригодных для применения в микросборках миллиметрового диапазона, и также в приемно-передающих модулях (ППМ).

Общепринято, что рабочая полоса частот оценивается по КСВ (коэффициент стоячей волны) входного фидера — при КСВ менее 2, что соответствует значению коэффициента отражения S11 менее минус 10 дБ. Частотная характеристика коэффициента отражения входа антенны или излучателя далее именуется амплитудно-частотной характеристикой входа (АЧХ). Направленность антенны оценивается коэффициентом усиления диаграммы направленности (КУДН).

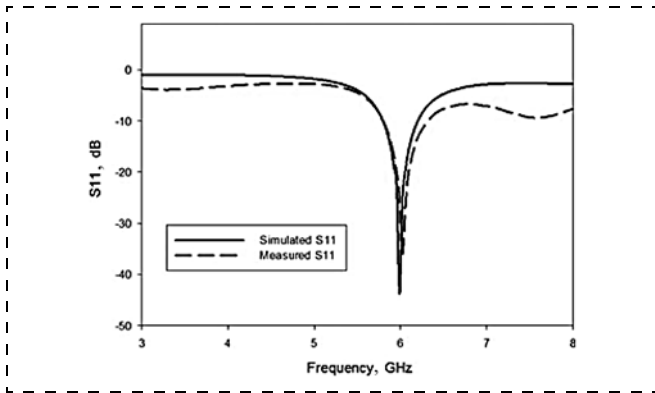


Рис. 1. АЧХ монополя

Как и в ранних работах [1–6] учтено деление антенн на классы:

— по числу слоев:

1) антенна на основе диэлектрика с двухслойной металлизацией (ДДМ);

2) антенна на основе многослойных планарных структур;

3) антенна с включением отдельных диэлектрических компонентов,

— по типу излучателя:

1) на основе монополя;

2) на основе диполя;

3) на основе вибратора;

4) щелевой;

5) антенна Вивальди;

6) рупорная антенна;

7) возбуждение монополя емкостной связью или через щель (апертурно-связанная антенна (АСА)).

Антенна должна удовлетворять следующим критериям:

— требуемая направленность диаграммы направленности;

— требуемая полоса частот;

— малые габаритные размеры.

Если на монополь сигнал поступает через подводящую линию, с ним соединенную, то монополь именуется активным, в остальных случаях — пассивным.

Прямоугольный активный монополь, широко применяемый в излучателях, имеет существенный недостаток — узкополосное согласование, обусловленное резонансным характером излучения [7]. Как известно, монополь имеет единственный минимум на частотной зависимости коэффициента отражения (рис. 1). Предлагаются различные модификации его топологии в целях расширения полосы согласования.

Ряд патентов, использующих монополь, направлен на повышение рабочей полосы частот за счет реализации широкополосного согласования.

Излучатель-монополь [8] представляет собой прямоугольник с прорезами сбоку от подводящей сигнал микрополосковой линии (рис. 2) и требует для реализации ДДМ.

В патенте [9] защищена антенна-монополь 21 сложной формы с пассивными монополями 4 (рис. 3). Получена относительно широкая рабочая полоса с широкополосными характеристиками.

Модификация монополя предложена в патенте [10]. Сбоку от основного монополя 1 выполнены пассивные монополи 2 U-образной формы, которые исполняют роль резонаторов (рис. 4). Это позволяет получить широкополосное согласование в существенно большей полосе частот (рис. 5).

Антенну с весьма широкой полосой 57...66 ГГц (рис. 6) на основе ДДМ защищает патент [11]. Ее особенностями являются заземление монополя 104 в средней точке и подвод сигнала с двух сторон.

Монополь 3 с дополнительными пассивными излучателями 4 обеспечивает полосу 77...81 ГГц (рис. 7) [12].

Оптимальные соотношения размеров для антенны (рис. 8) W-диапазона описаны в патенте

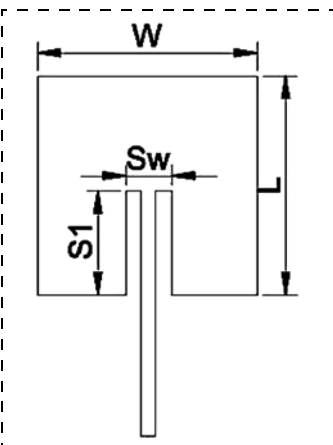


Рис. 2. Топология монополя

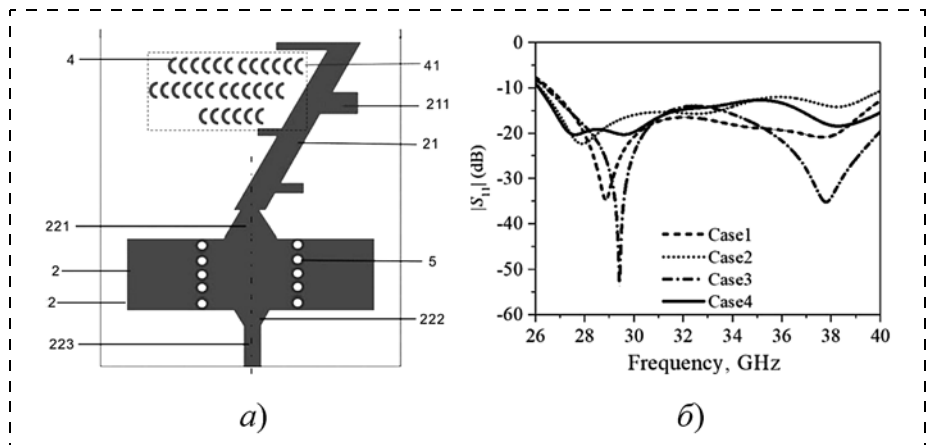


Рис. 3. Излучатель-монополь:

а — топология; б — АЧХ

[13]. Получено широкополосное согласование (непрерывная линия на рис. 9).

Предложена антенна (рис. 10) в виде параллельного соединения последовательно соединенных монополей [14]. Приведенная характеристика согласования имеет два максимума, которые требуют дополнительного согласования (рис. 11).

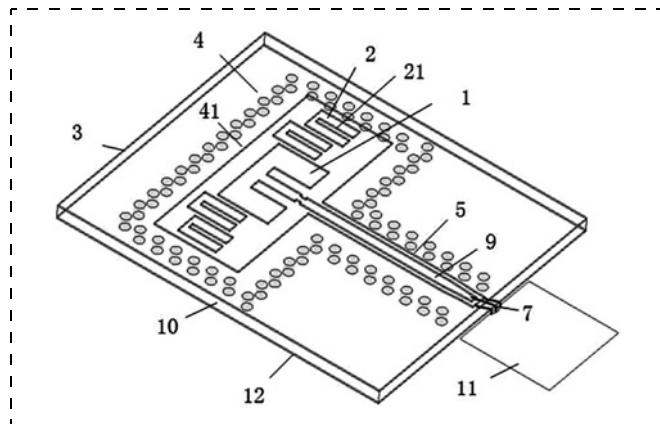


Рис. 4. Строение излучателя на основе монополя

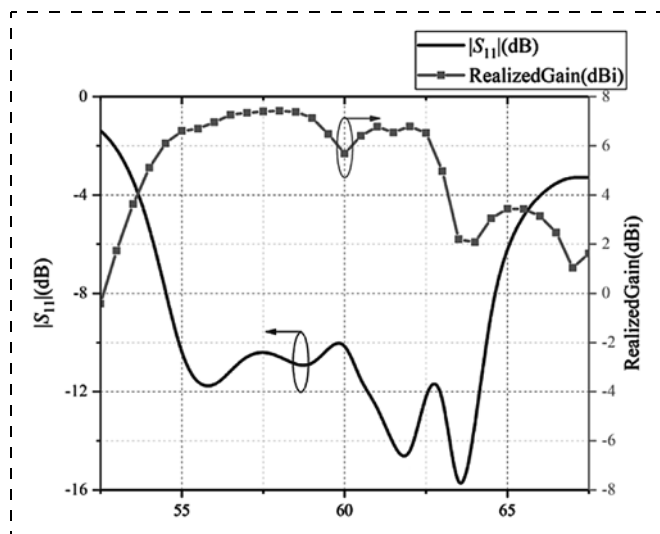


Рис. 5. АЧХ излучателя на основе монополя

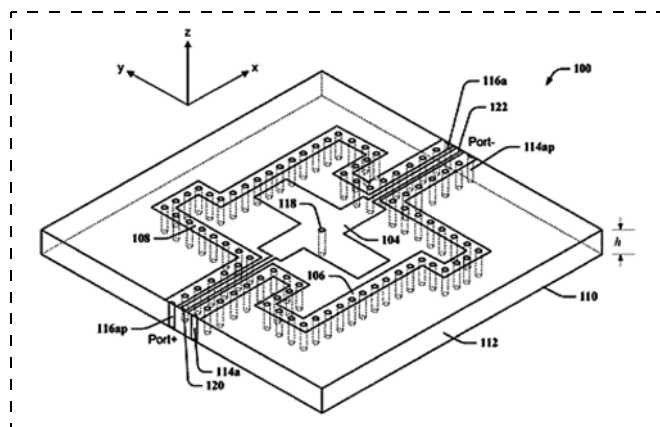


Рис. 6. Строение антенны [11]

В патенте [15] рассматривается антенна с параллельно работающими излучателями последовательно соединенных монополей, которая запитывается фидерами различной длины (рис. 12). КУДН превышает 15 дБи в полосе 23,2...25,0 ГГц.

Для антенны W-диапазона (рис. 13, а) проведена оптимизация топологии делителя (рис. 13, б) [16].

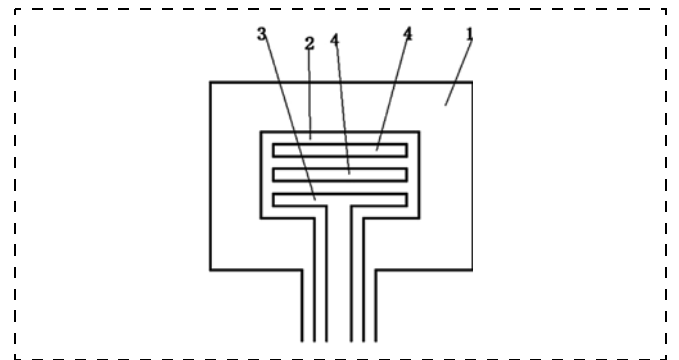


Рис. 7. Строение антенны [12]

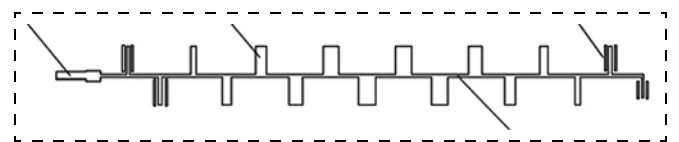


Рис. 8. Топология верхнего проводящего слоя антенны

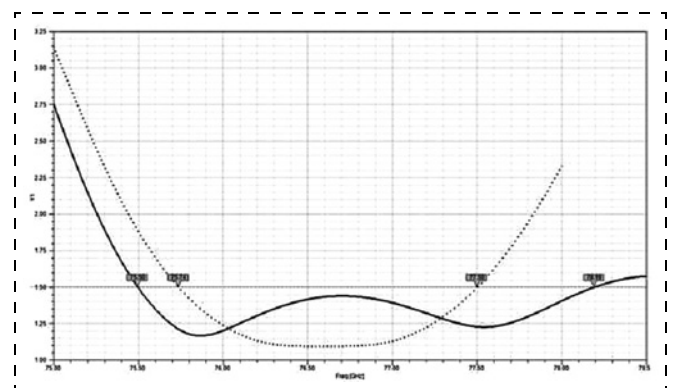


Рис. 9. АЧХ излучателя

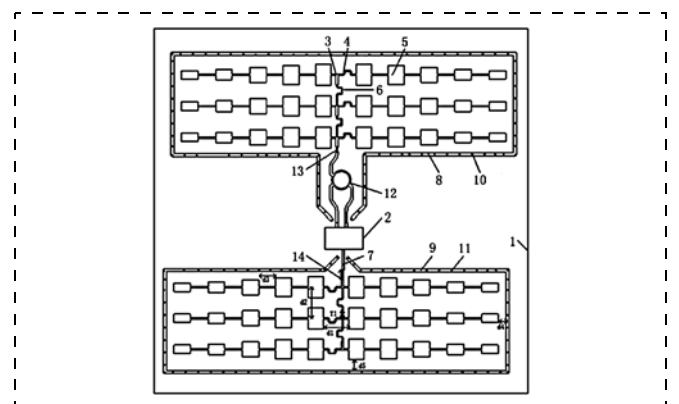


Рис. 10. Передающая и приемная антенны в виде параллельного соединения последовательно соединенных монополей



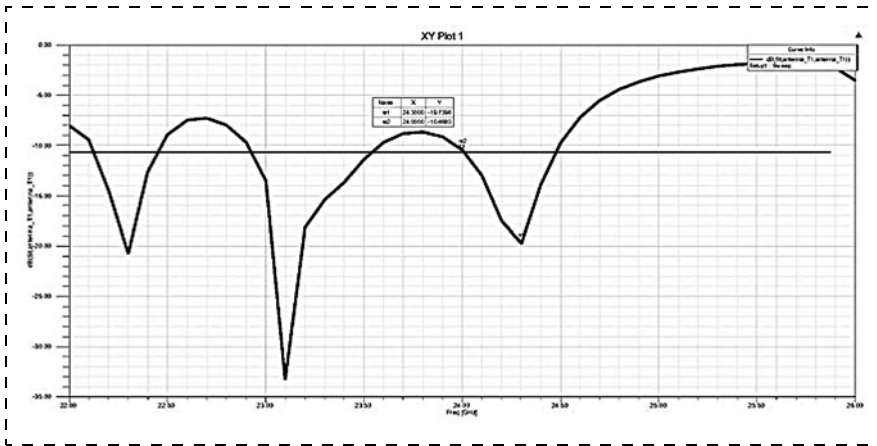


Рис. 11. АЧХ антенны [14]

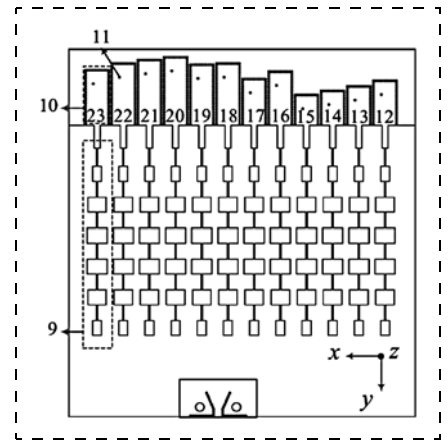


Рис. 12. Топология верхнего проводящего слоя антенны

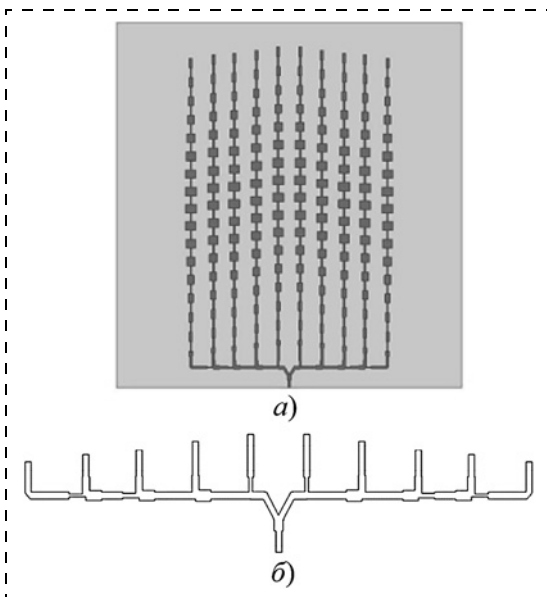


Рис. 13. Топология [16]:  
а — излучателя в целом; б — делителя

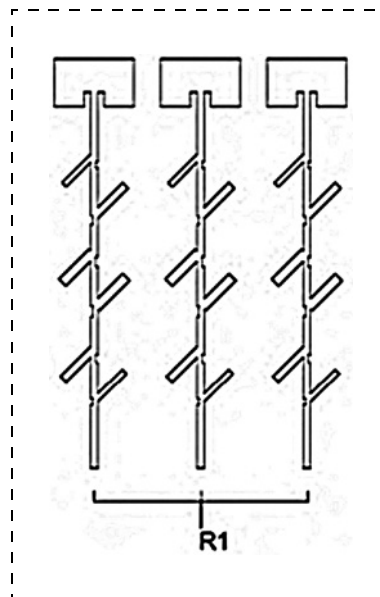


Рис. 14. Топология антенны [17]

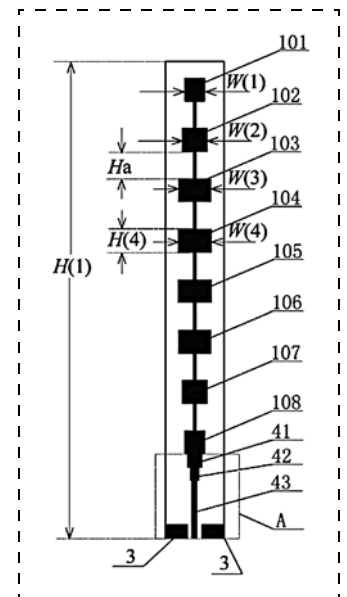


Рис. 15. Строение антенны [18]

Предлагаются согласующие цепи для излучателей-монополь (рис. 14) [17].

Антенна, описанная в патенте [18] (рис. 15), имеет рабочую полосу 74,5...81,0 ГГц. Подобная структура защищена также в патенте [19].

В патенте [20] описана антенна из параллельно соединенных линейных соединений monopoles и строение делителя 210 (рис. 16).

Данный тип излучателя использован при разработке антенны Ка-диапазона (24,25 ГГц) на основе четырехслойной платы из ламината Arlon25N [21]. Использована антенна (рис. 17) в виде соединения monopoles подобно рис. 13, но с идентичными звеньями. Микросборка ППМ (рис. 18) имеет весьма значительный размер 75 × 93 мм.

Антенна вида рис. 13, описанная выше, исследована в работе [22] (рис. 19). Изготовлен ППМ на основе трехслойной платы из материала *liquid*

*crystal polymer* (LCP). Сечение платы показано на рис. 20, при этом теплоотвод модуля реализован на верхнюю сторону платы. Общий вид ППМ в сборе показан на рис. 21. АЧХ реализованного излучателя представлено на рис. 22, он обеспечивает рабочую полосу примерно 75...80 ГГц. Сравнение с приведенными выше патентами показывает, что использованы не все возможности данного типа излучателя при достижении широкополосности.

Топология приемной и передающей антенн в виде последовательного соединения monopoles (рис. 23) на одной плоскости защищена в патенте [23].

Исследован излучатель, представляющий monopole с поперечными прорезями или последовательное соединение monopoles С-образными шлейфами (рис. 24). Благодаря соединению monopoles прямыми шлейфами (см. рис. 8) достигнуто суще-

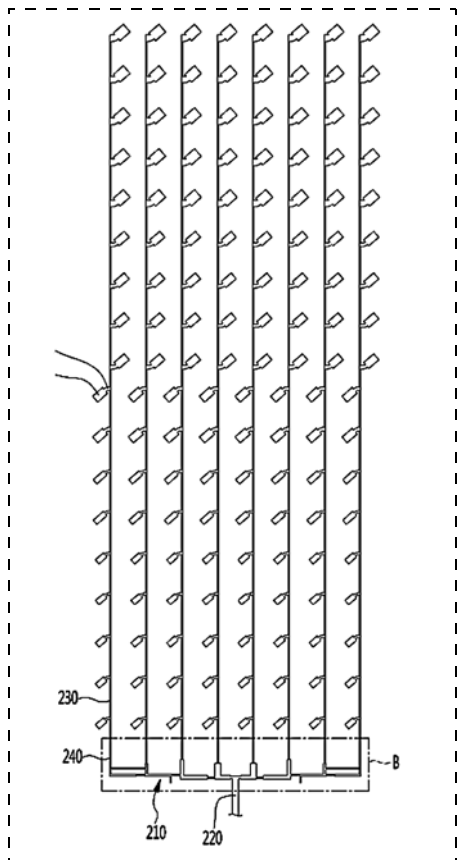


Рис. 16. Строение антенны [20]

ственное снижение размеров излучателя. Рабочая полоса частот составляет 28...39 ГГц (рис. 25) [24].

Для частоты 24 ГГц предложена антенна вида "последовательно-параллельное соединение" монополей (рис. 26) [25].

Антенна с круговой поляризацией из четырех монополей над земляным проводником (рис. 27) для сравнительно узкой рабочей полосы частот 23,8068—24,5191 ГГц защищена в патенте [26].

Излучатель-монополюль (рис. 28, а) дополнен слоем диэлектрика с метаструктурами (рис. 28, б) [27]. Дополнительная плата расположена с зазором над монополюлем (рис. 29). Это позволило расширить рабочую полосу частот и в два раза увеличить КУДН (рис. 30).

Антенна со строением, близким к показанному на рис. 4, описана в патенте [28]. Здесь (рис. 31) 121 — активный монополюль, 122 — пассивные монополюли. АЧХ имеет широкополосный вид (рис. 32), с двумя рабочими полосами в диа-

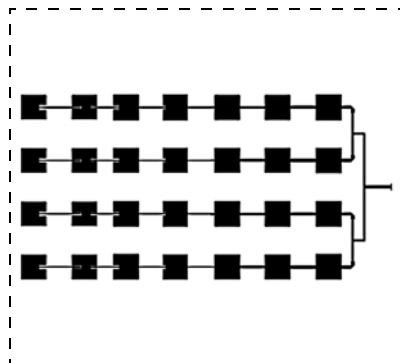


Рис. 17. Строение антенны [21]

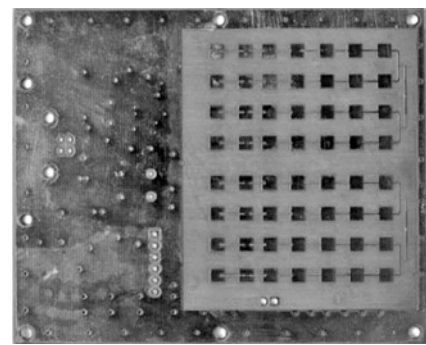


Рис. 18. Общий вид антенны в составе ПИМ

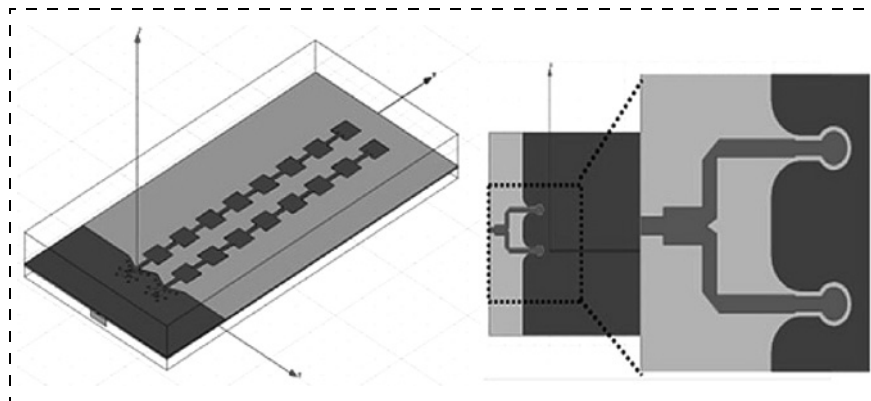


Рис. 19. Строение излучателя из двух линий монополюлей и делителя сигнала для двух линий

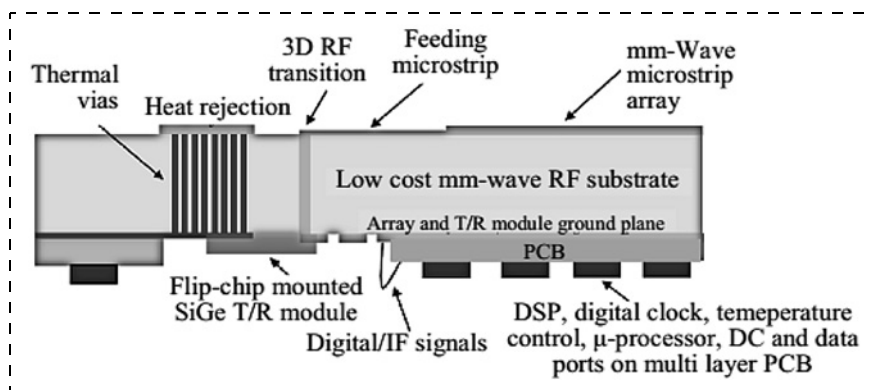


Рис. 20. Сечение ПИМ

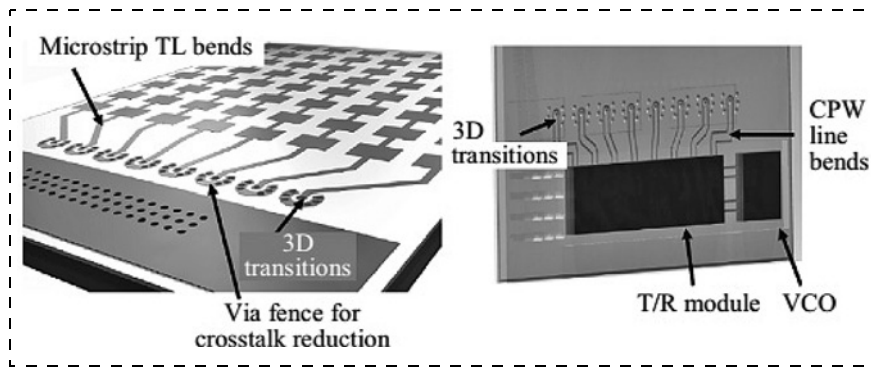


Рис. 21. Общий вид основной платы с антенной

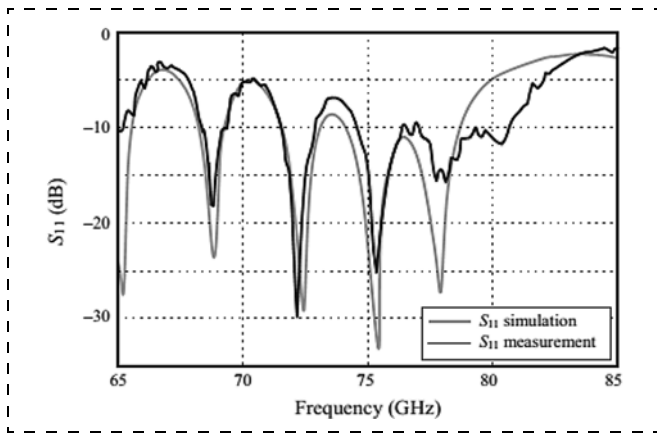


Рис. 22. АЧХ излучателя

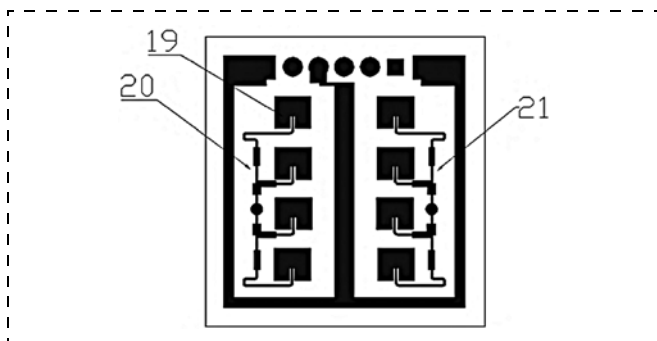


Рис. 23. Топология антенны [23]

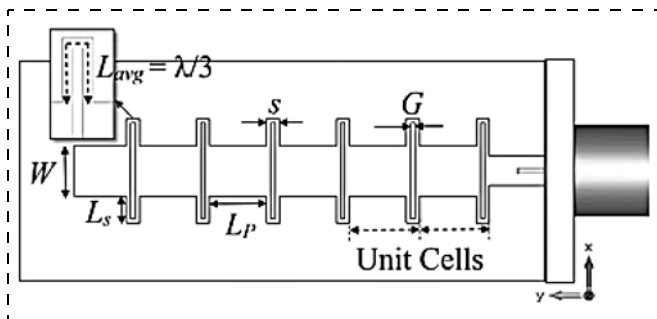


Рис. 24. Последовательное соединение монополей

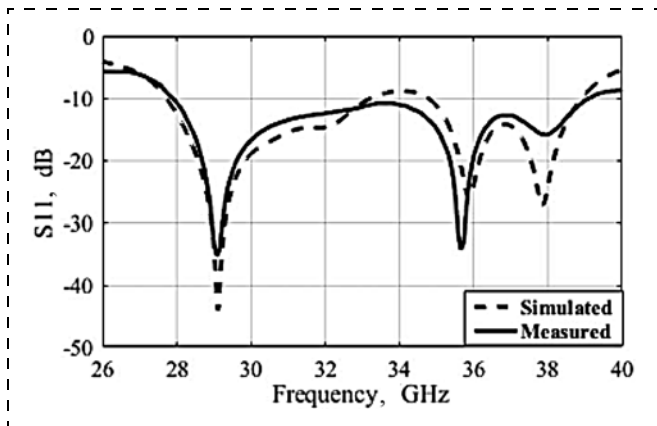


Рис. 25. АЧХ излучателя [24]

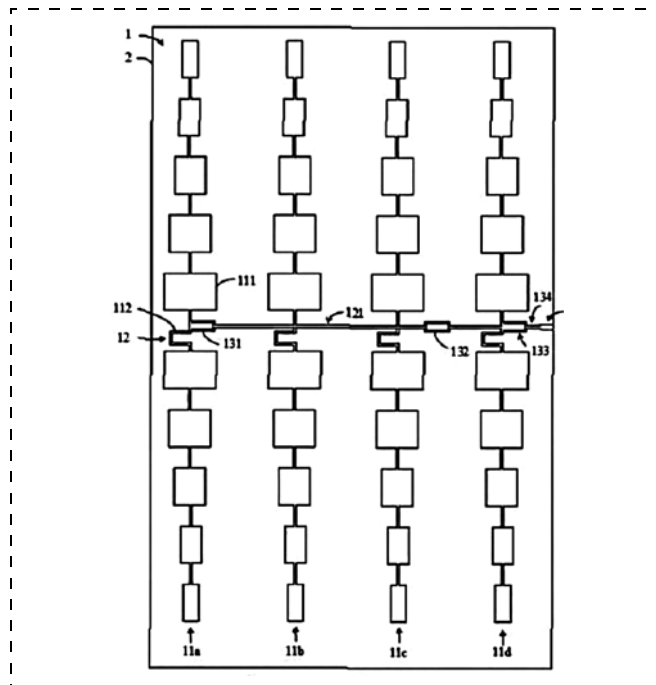


Рис. 26. Топология антенны [25]

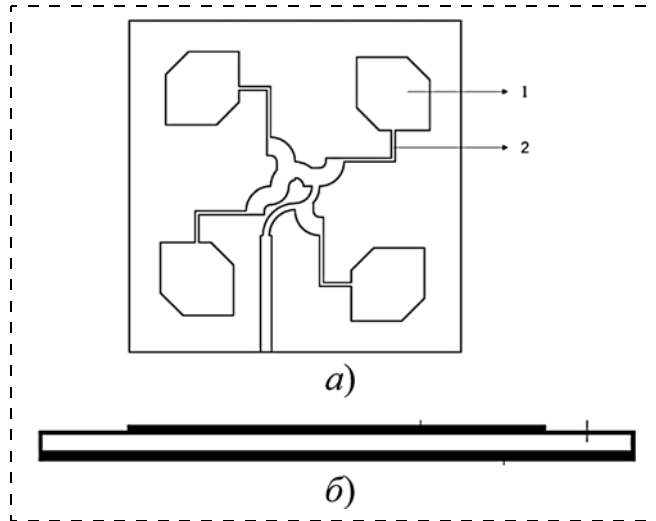


Рис. 27. Строение антенны [26]:  
а — вид сверху; б — сечение

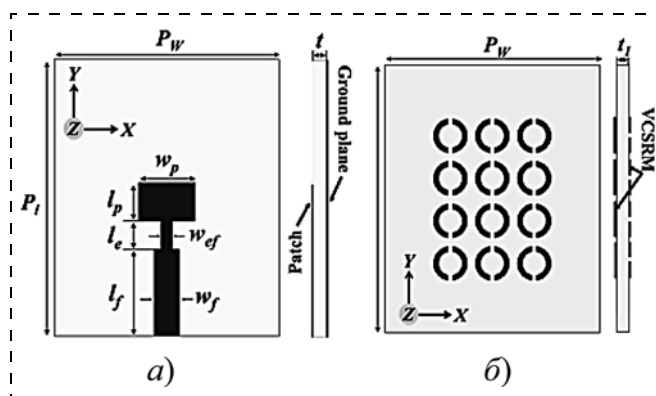


Рис. 28. Строение слоя диэлектрика с монопомем (а) и слоя с метаструктурами (б)

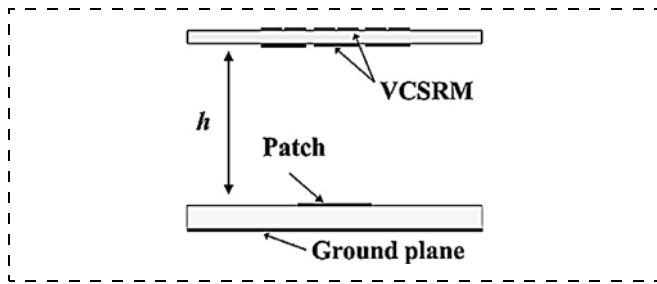


Рис. 29. Расположение дополнительной платы

пазонах 27...30 ГГц и 37...41 ГГц. В составе излучателя имеется значительное число изолированных проводников, оптимизация формы которых может уменьшить отражение в интервале 30...37 ГГц.

Антенна из ряда монополей на основе трехслойной металлизации, в которой сигнал подается в оптимальные точки нескольких монополей, дополненная пассивными монополями, показала широкополосное согласование в Ка-диапазоне (27...32 ГГц) и в полосе 36...42 ГГц [29]. Топология

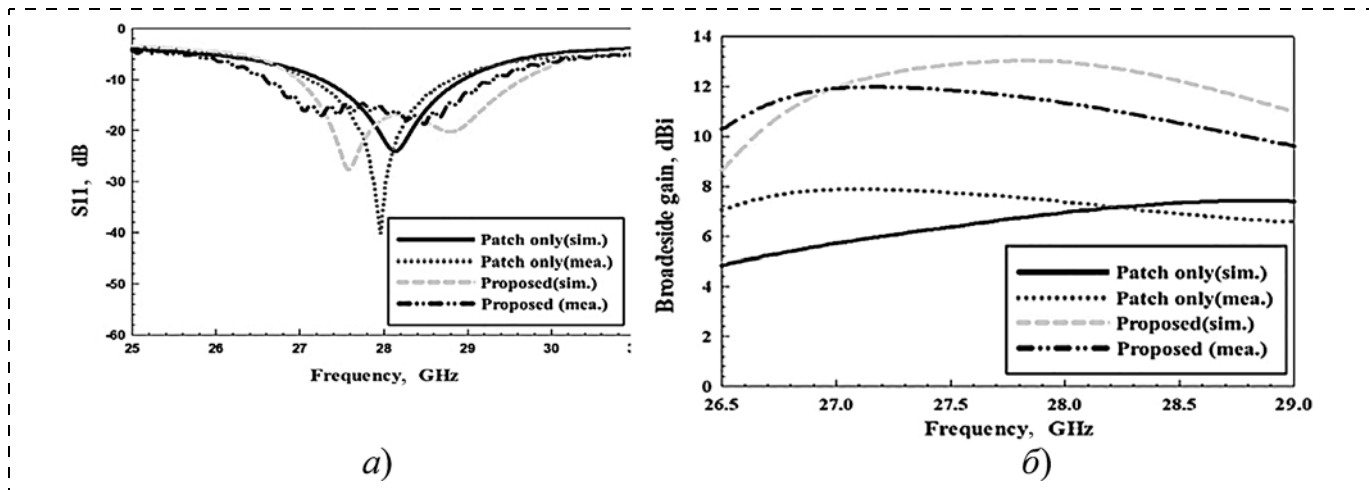


Рис. 30. АЧХ (а) и частотная зависимость КУДН (б) вариантов излучателя

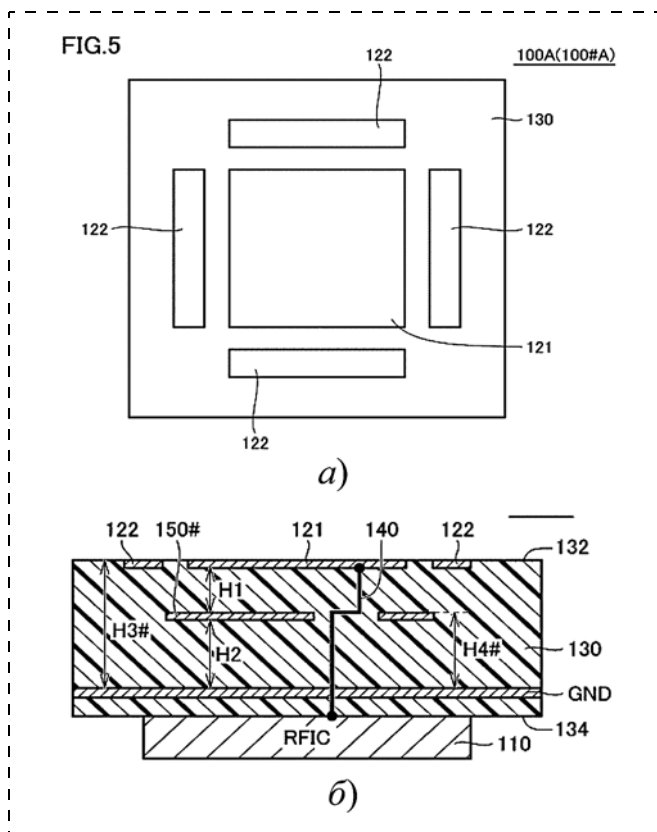


Рис. 31. Излучатель на основе монополя: а — топология верхнего проводящего слоя; б — сечение

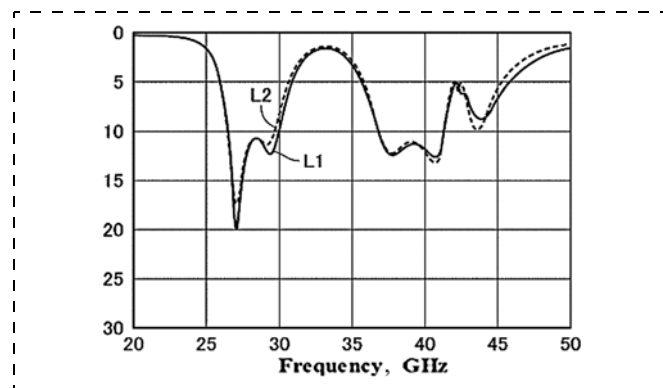


Рис. 32. АЧХ излучателя на основе монополя

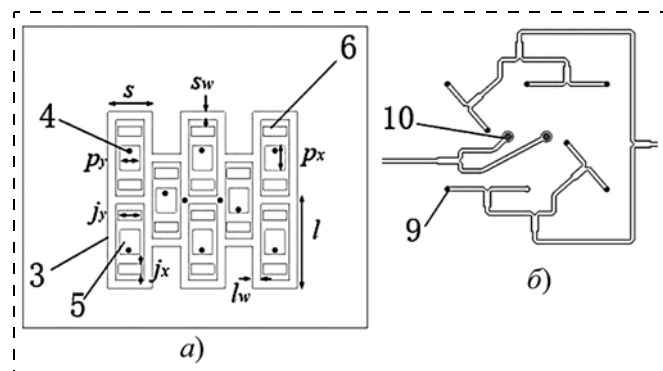
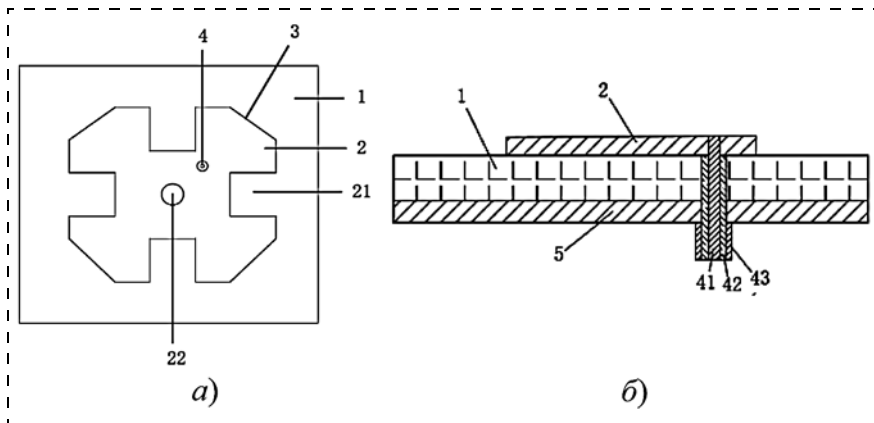
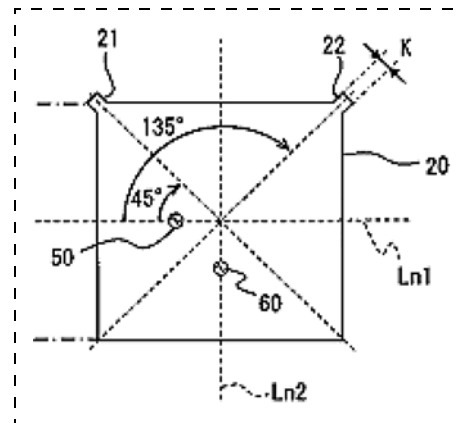


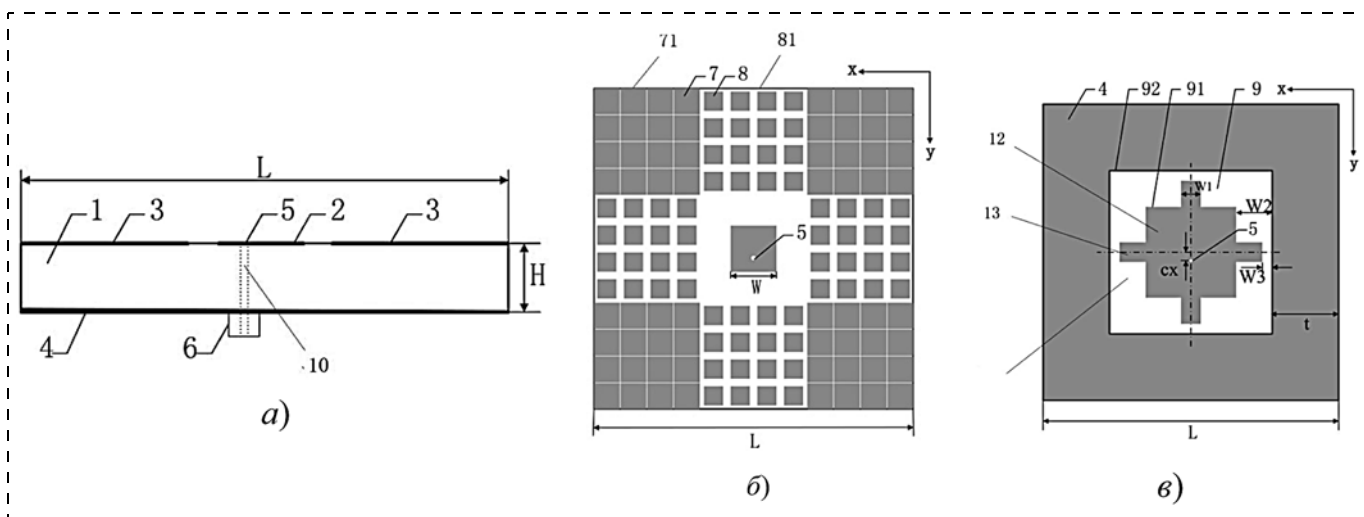
Рис. 33. Топология антенны [29]: а — верхняя металлизация; б — средняя металлизация — подводящие линии



**Рис. 34. Излучатель на основе монополя [30]:**  
*a* — топология верхнего проводящего слоя; *б* — сечение



**Рис. 35. Топология верхнего проводящего слоя излучателя на основе монополя**



**Рис. 36. Излучатель [32]:**  
*a* — сечение; *б* — первый вариант верхнего слоя металлизации; *в* — второй вариант верхнего слоя металлизации

верхнего и среднего слоев показана на рис. 33, третий слой — сплошной металлизированный экран. Размер антенны —  $19,3 \times 18,0$  мм, КУДН достигает 13,5 дБи.

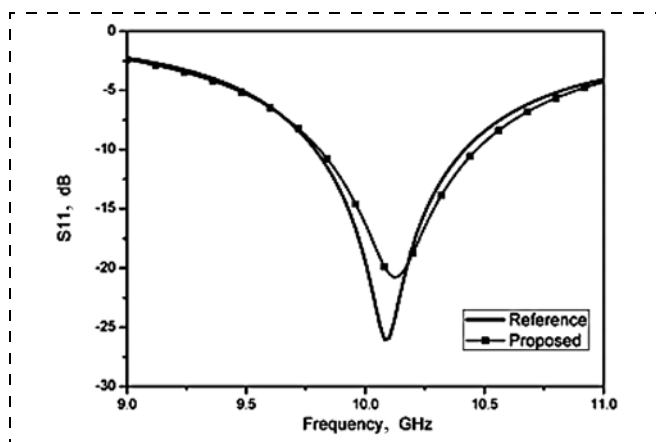
В патенте [30] защищается устройство излучателя монополя 3 с оптимальным местом подачи сигнала 4 и отверстием 22 (рис. 34).

Оптимальные точки 50 и 60 подачи дифференциальных сигналов на монополь 21 также защищает патент [31] (рис. 35).

Предлагаются решения, направленные на повышение характеристики излучателя из ДДМ. В патенте [32] предложена оптимизация формы монополя (рис. 36). Однако вид АЧХ существенно не изменился относительно исходного монополя (рис. 37).

Два идентичных последовательных соединения монополей образуют антенну, представленную на рис. 38, входной сигнал подается в точки 10. Получено узкополосное согласование (рис. 39) при КУДН до 11 дБи [33].

В патенте [34] предложено соединение из четырех монополей для создания излучателя с двойной поляризацией (рис. 40). В относительно узкой полосе 5,4...6,2 ГГц достигнута высокая развязка между точками подачи 14 и 15.



**Рис. 37. АЧХ предложенной структуры**



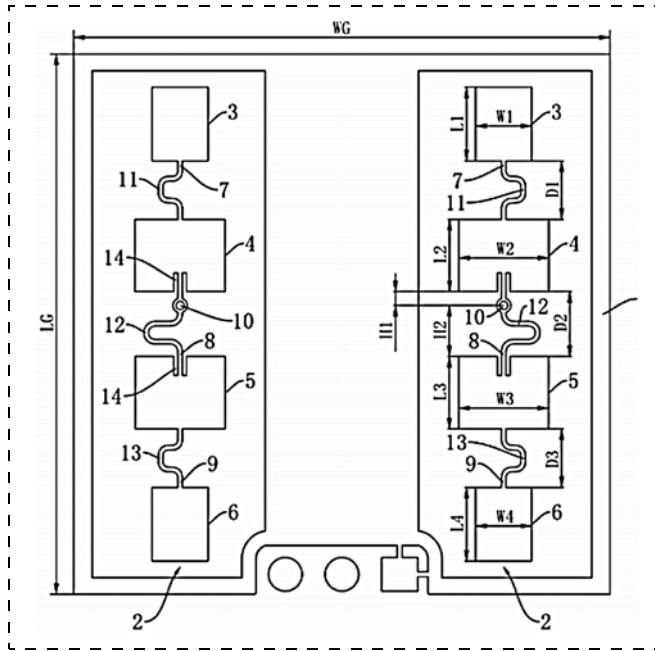


Рис. 38. Топология верхнего проводящего слоя антенны

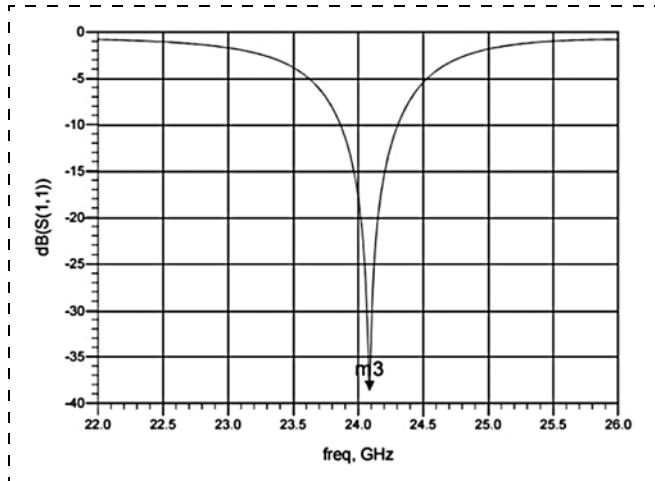


Рис. 39. АЧХ антенны

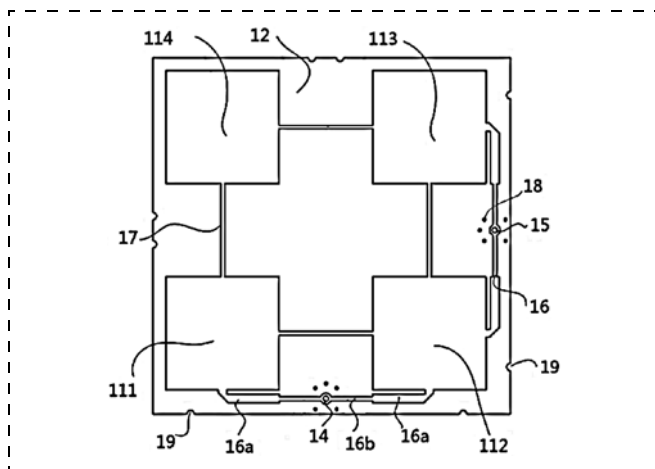


Рис. 40. Топология излучателя с двойной поляризацией

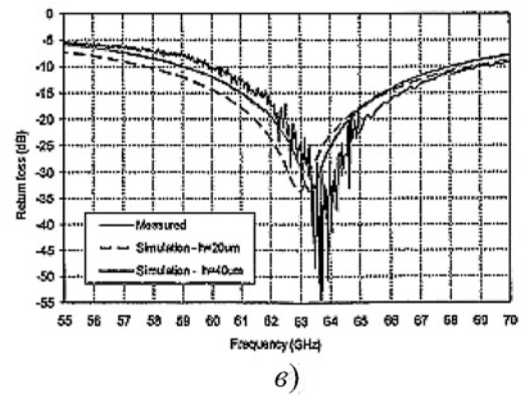
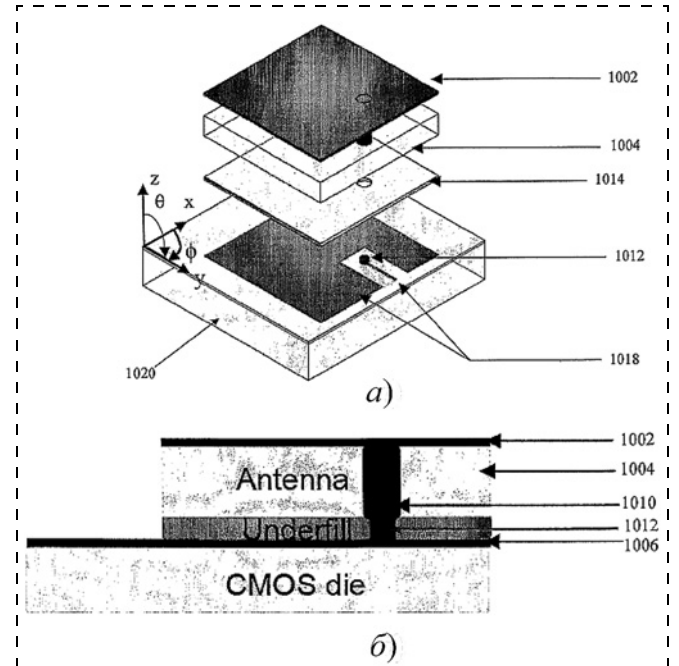


Рис. 41. Излучатель-монополь [35]:

*a* — топология; *б* — сечение; *в* — характеристики

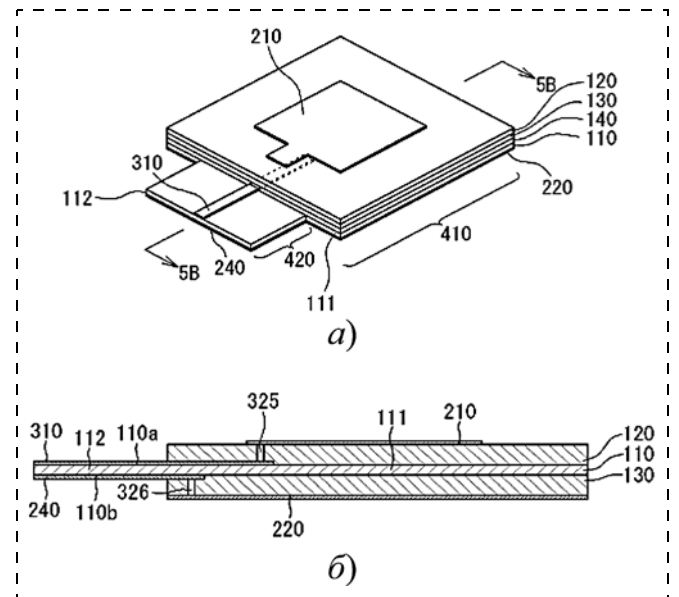


Рис. 42. Излучатель-монополь [36]:

*a* — общий вид; *б* — сечение

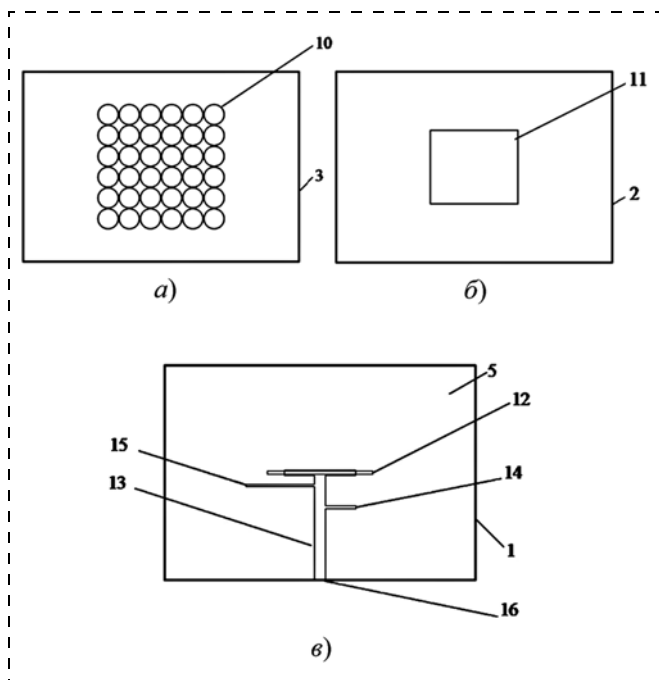


Рис. 43. Топология верхнего (а), среднего (б) и нижнего (в) проводящих слоев антенны [37]

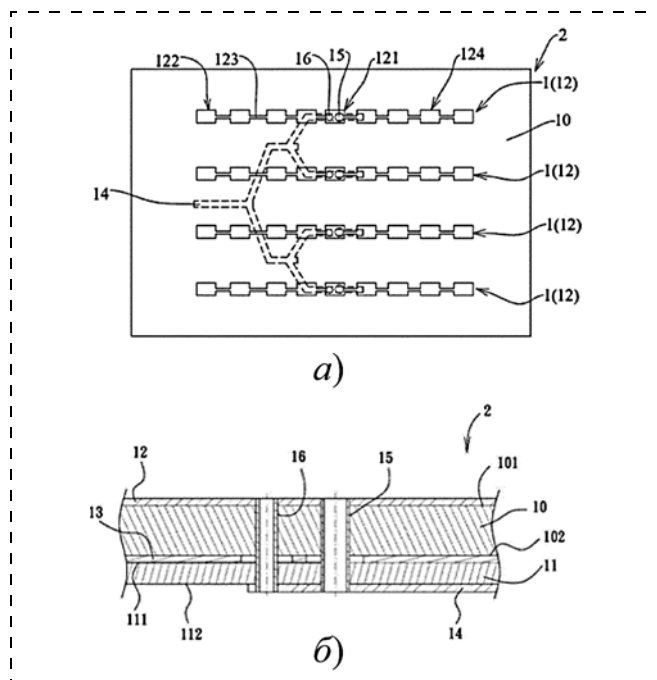


Рис. 44. Антенна [38]: а — строение; б — сечение

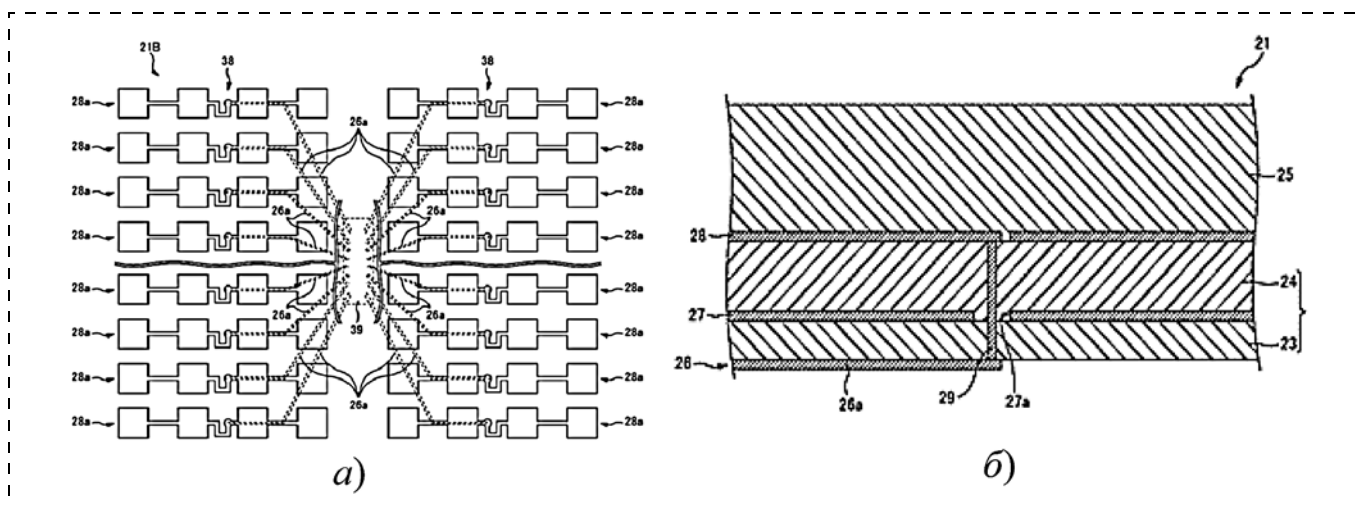


Рис. 45. Строение передающей и приемной антенн: а — общий вид; б — сечение

Реализация монополя над земляным экраном (рис. 41) описана в патенте [35]. Частотные характеристики представлены на рис. 41, в.

Монополь 210 на многослойной подложке 410 с подачей сигнала из нижнего слоя (рис. 42) защищен в патенте [36].

Трехслойная антенна с пассивным монополем (рис. 43) обеспечивает полосу частот более октавы: 1,85...4,03 ГГц [37].

Защищается конструкция антенны из ряда монополей для частоты 77 ГГц с тремя слоями металлизации [38]. Подводящая линия 14 выполнена в нижнем слое под земляным слоем 13, монополи выполнены в верхнем слое металлизации 12

(рис. 44). Близкая структура защищена в патенте [39] (рис. 45), в которой реализованы отдельно передающая и приемная антенны как соединение монополей.

Описана антенная решетка Ка-диапазона в окрестности частот 24 ГГц, выполненная на трехслойной металлизации (рис. 46) [40]. Использован излучатель в виде монополя-спирали 123.

Реализована антенна из  $4 \times 4$  излучателей на ДДМ размером  $50 \times 50$  мм (рис. 47) [41]. Получена полоса более 10 ГГц в Ка-диапазоне при КУДН более 12 дБи (рис. 48).

Модификация монополя с многочисленными прямоугольными щелями (рис. 49) позволила по-

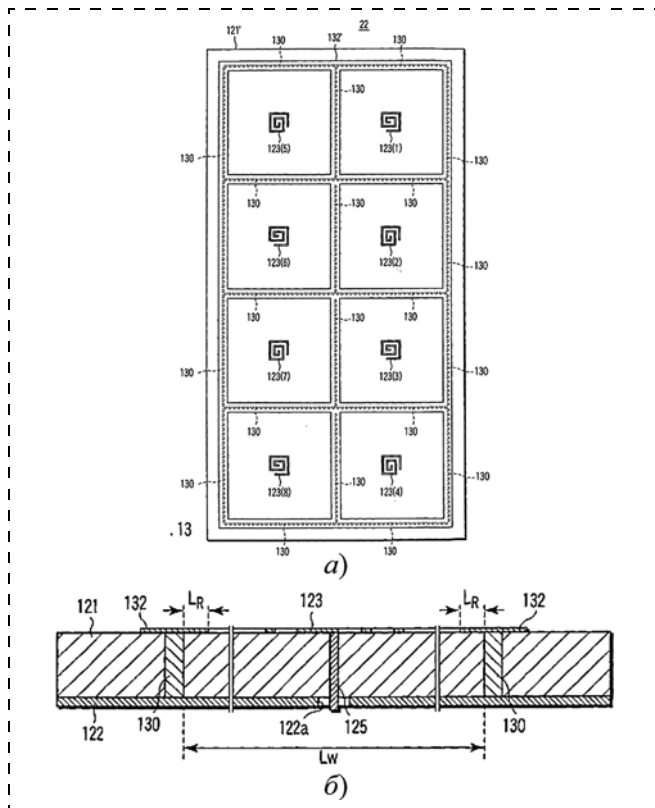


Рис. 46. Антенная решетка:  
*a* — вид сверху; *b* — сечение антенны

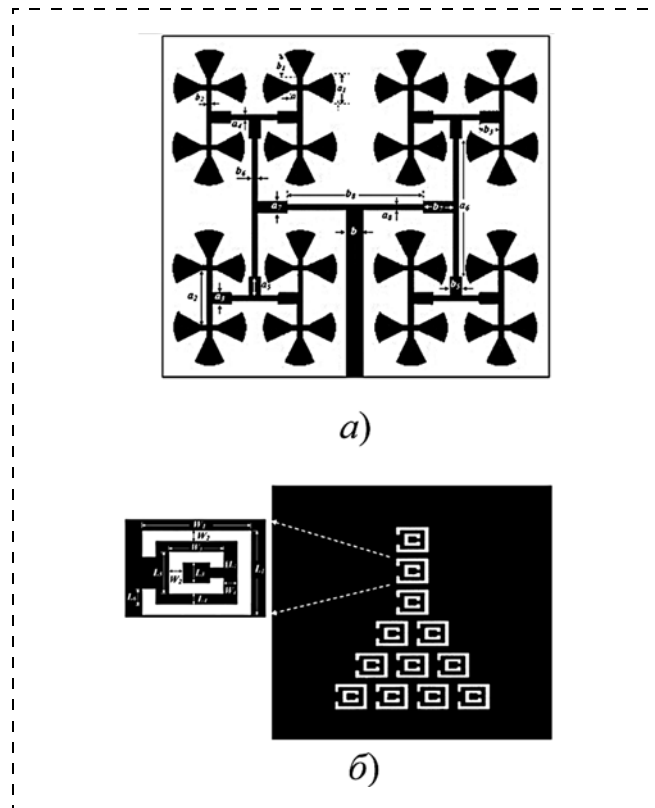


Рис. 47. Топология слоев модифицированного монополя

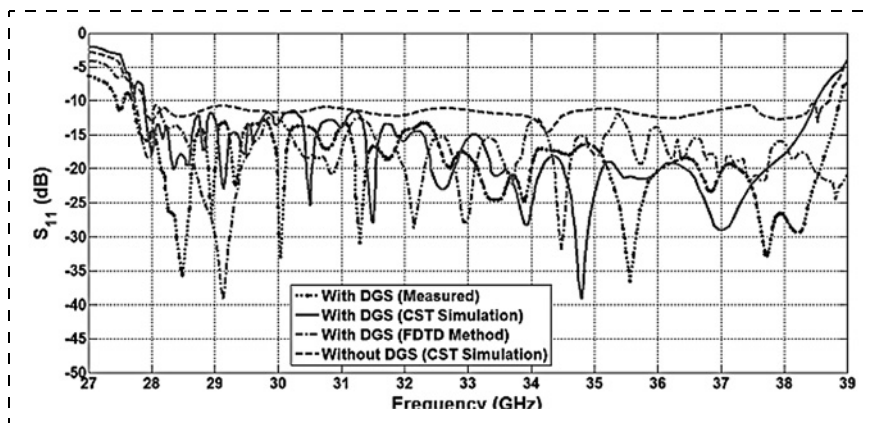


Рис. 48. АЧХ модифицированного монополя

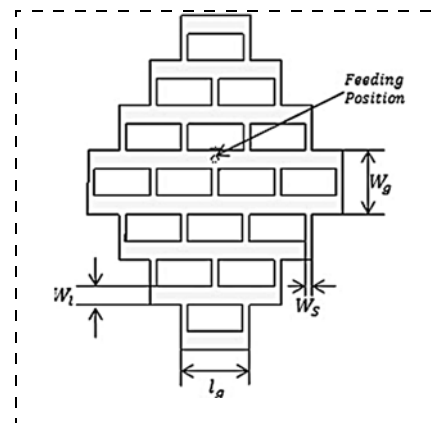


Рис. 49. Модификация монополя прямоугольными щелями

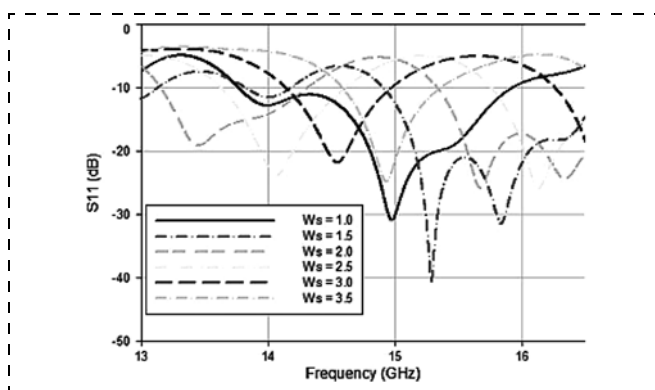


Рис. 50. АЧХ излучателя [42]

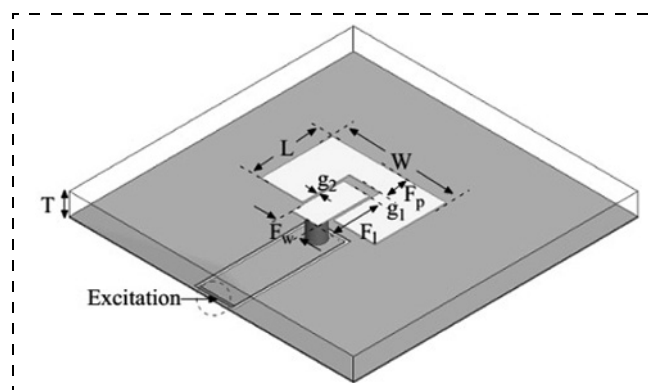


Рис. 51. Структура излучателя с емкостной связью

лучить форму частотной зависимости отражения с несколькими минимумами, показанную на рис. 50 [42].

Излучатели с емкостной связью с монополем (рис. 51) на основе ДДМ исследованы в работе [43]. Субрешетки с линейной и круговой поляризацией (рис. 52) показали широкую полосу согласования (рис. 53).

Монополь сложной формы с пассивными монополями на основе ДДМ (рис. 54) описан в работе [44]. Данная топология позволяет реализовать широкополосное согласование (рис. 55).

Добавление изогнутых шлейфов к монополю над экраном (рис. 56) позволило получить частотную зависимость уровня отражения с многими

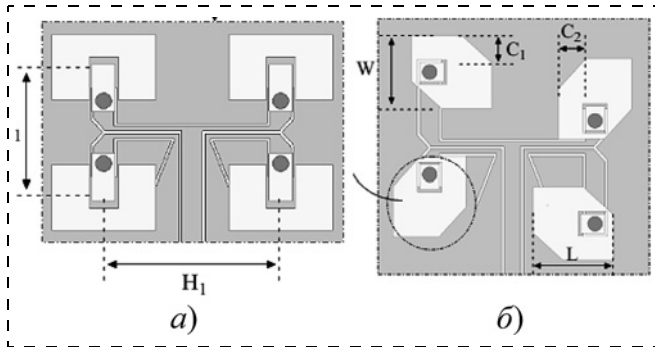


Рис. 52. Субрешетка с линейной поляризацией (а), субрешетка с круговой поляризацией (б)

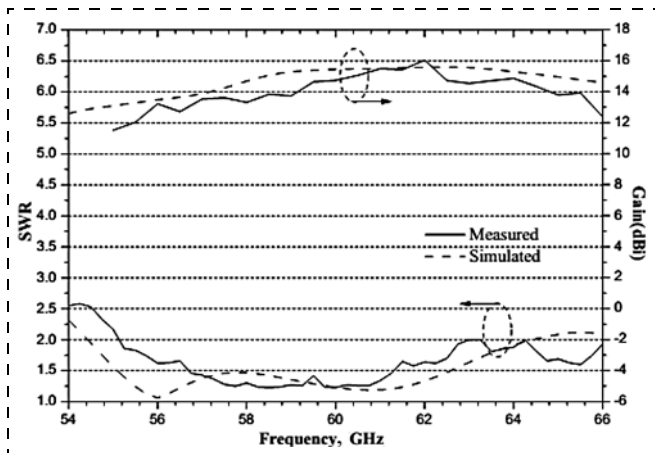


Рис. 53. Характеристики субрешетки с круговой поляризацией

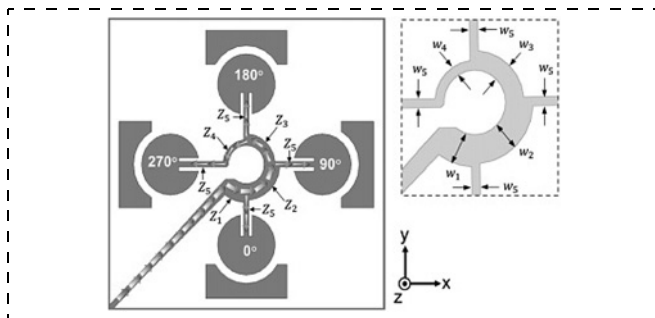


Рис. 54. Топология излучателя-монополя [44]

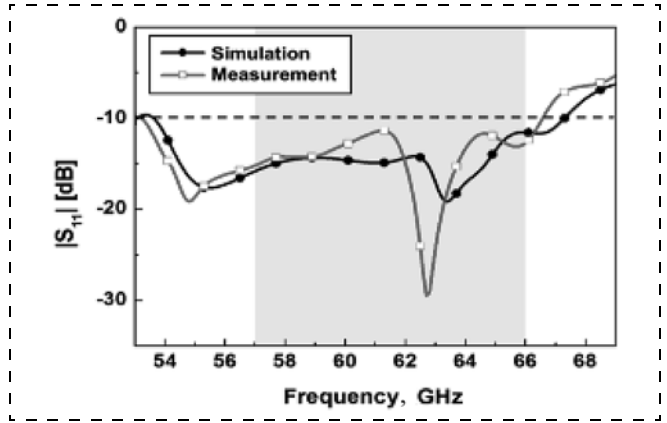


Рис. 55. АЧХ излучателя-монополя [44]

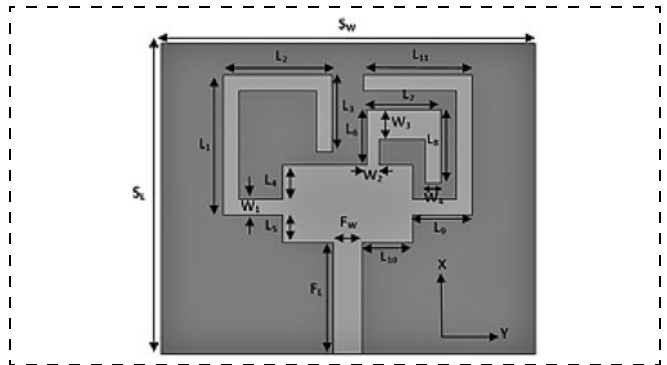


Рис. 56. Топология монополя

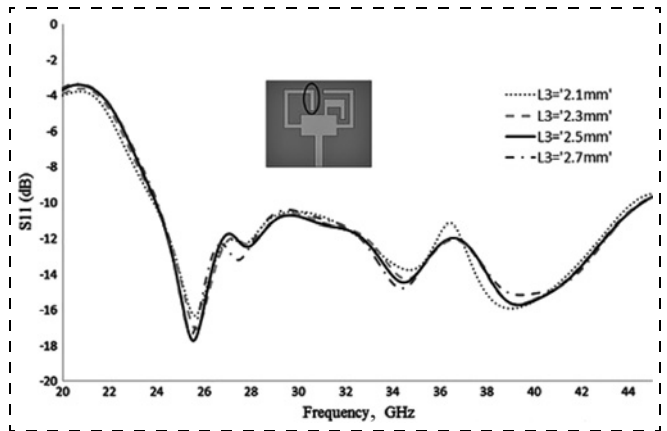


Рис. 57. АЧХ монополя

минимумами (рис. 57). Получена октавная полоса, но при весьма малом КУДН (менее 2 дБи). Размер излучателя  $10 \times 12$  мм [45]. Эта АЧХ существенно отличается от АЧХ прямоугольного монополя (см. рис. 1).

В работе описан оригинальный метод расширения полосы излучателя из линейки монополей (рис. 58). Фидеры выполняются с индивидуальными параметрами, что обеспечивает несколько близко расположенных минимумов на частотной зависимости (рис. 59) при размере излучателя  $50 \times 40$  мм [46]. КУДН лежит в пределах 1,3...7,17 дБи.

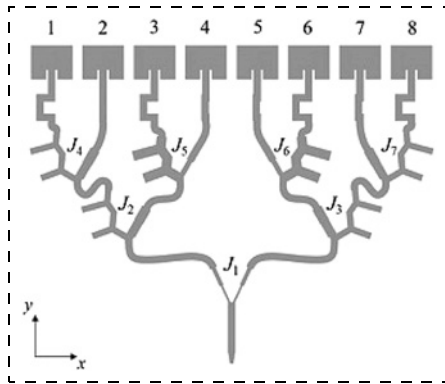


Рис. 58. Топология излучателя [46]

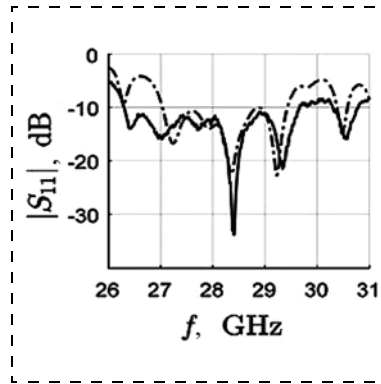


Рис. 59. АЧХ излучателя

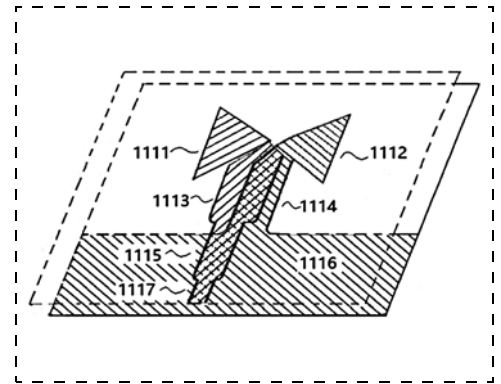


Рис. 60. Структура дипольного излучателя

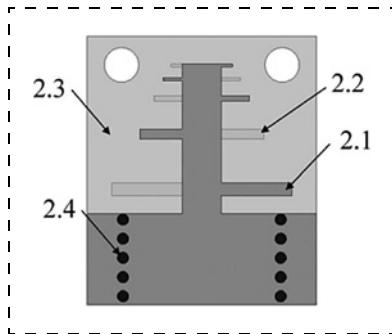


Рис. 61. Структура излучателя-диполя

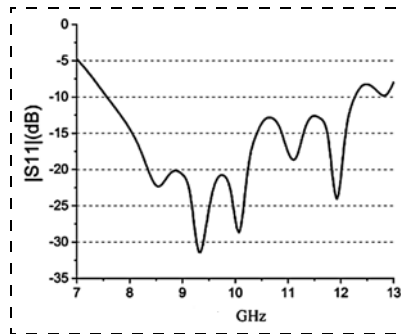


Рис. 62. АЧХ излучателя-диполя

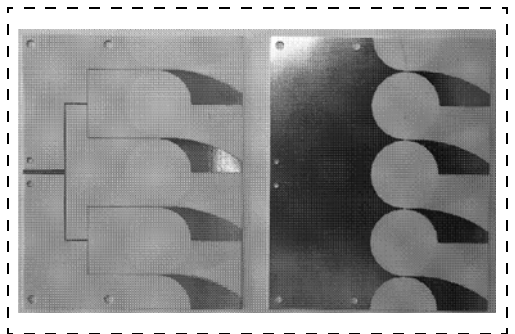


Рис. 63. Топология монополей и металлизации

Для дипольного излучателя на основе ДДМ предложена модификация фидера 1113, 1114, который преобразует сигнал, подаваемый через микрополосковую линию 1117, в дифференциальный, подаваемый на два излучателя 1111 и 1112 (рис. 60) [47]. Оптимизация длины и сечения проводников 1113 и 1114, расположенных на двух сторонах диэлектрика, позволяет расширить частотный диапазон согласования.

Излучатель в виде диполей, выполненных на противоположной стороне ДДМ, показан на рис. 61 [48]. Зависимость согласования от частоты показана на рис. 62. Полоса может быть расширена дополнительным согласованием и оптимизацией шлейфов 2.1 и 2.2 в районе 11 ГГц.

В патенте [49] защищаются топологии диполя, возбуждаемого микрополосковой линией, и слоя металлизации обратной стороны (рис. 63), что существенно расширяет полосу частот.

Излучатели-диполи, также выполненные в двух слоях металлизации (рис. 64), исследованы в работе [50]. Для антенной решетки с размерами  $W_{sub} = 37,6$  мм,  $L_{sub} = 14,3$  мм получена рабочая полоса 23,41...33,92 ГГц и максимум КУДН = 10,7 дБи.

В патенте [51] защищается строение диполя на основе ДДМ (рис. 65), обеспечивающий при весьма простом строении полосу 24...29 ГГц.

Квадруполь подобного сечения (рис. 66) имеет незначительно большую полосу 24...30 ГГц при круговой поляризации [52].

В патенте [53] диполи 2, 3 дополнены пассивным монополем 5 и согласующими щелями 35 и 36 в нижнем слое металлизации (рис. 67). Реализация антенны показала два минимума АЧХ — между точками М1, М2 и точками М3, М4 (рис. 68). Скорее всего, дополнительная оптимизация позволит снизить уровень АЧХ между точками М2 и М3 и получить рабочую полосу частот 25...42 ГГц.

Предложен ДДМ широкополосный излучатель, который обеспечивает излучение диполем,

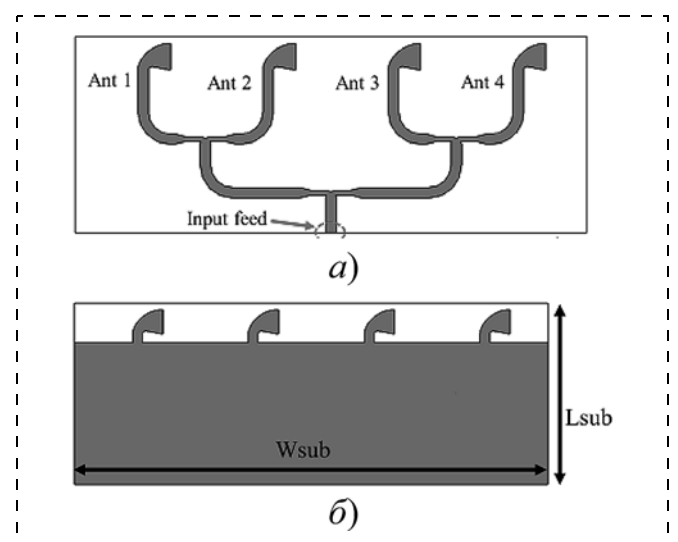
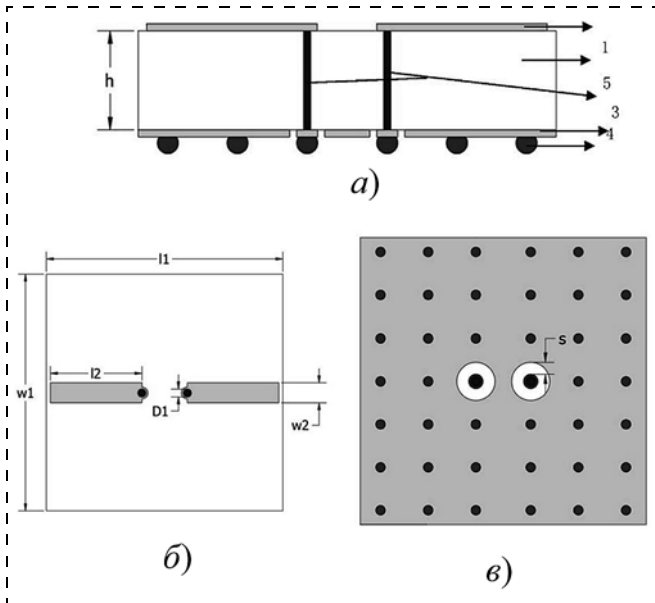
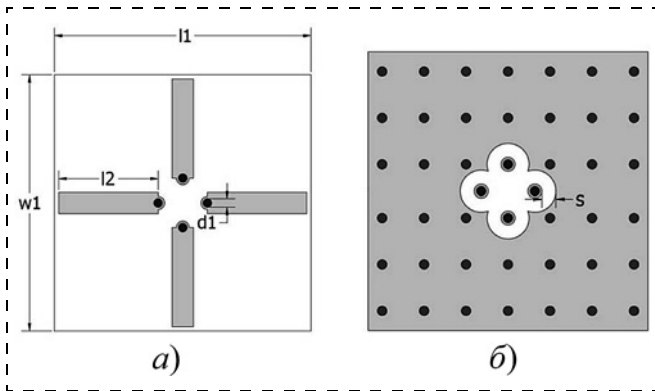


Рис. 64. Топология верхнего (а) и нижнего (б) слоев излучателя-диполя





**Рис. 65. Строение излучателя-диполя:**  
*a* — сечение; *б* — верхний слой; *в* — нижний слой



**Рис. 66. Строение излучателя-квадруполя:**  
*a* — верхний слой; *б* — нижний слой

возбуждаемым щелевой линией в нижнем слое металлизации (рис. 69) [54]. Щелевая линия возбуждается микрополосковым шлейфом М1 (М2), выполненным на верхнем слое металлизации. Получены две рабочих полосы частот: 24,6...42,1 и 50,1...52,5 ГГц при КУДН = 17,5 дБи и размерах 11 × 13 мм. Размеры могут быть уменьшены при более компактной реализации микрополосковой линии.

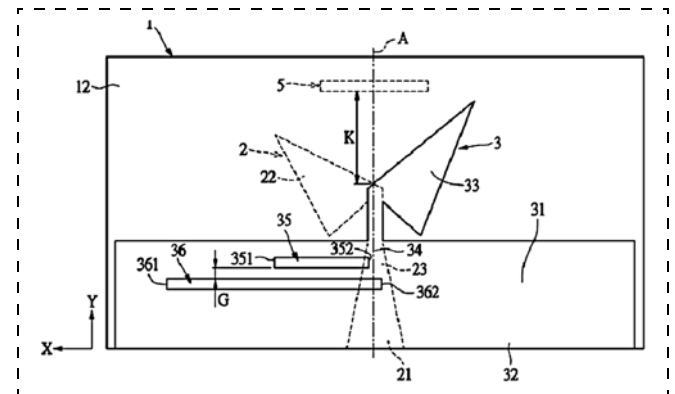
Вариант дипольной антенны на основе ДДМ (рис. 70) исследован в работе [55]. Получены характеристики, показанные на рис. 71. При дополнительном согласовании превышение отражения на 10 дБ может быть устранено и полоса составит 25,0...29,7 ГГц.

Излучатель из двух пар диполей (рис. 72), рабочая полоса частот 3,0...3,8 ГГц при КУДН > 6 дБи. На каждую пару диполей сигнал подается отдельной парой вертикальных проводников [56].

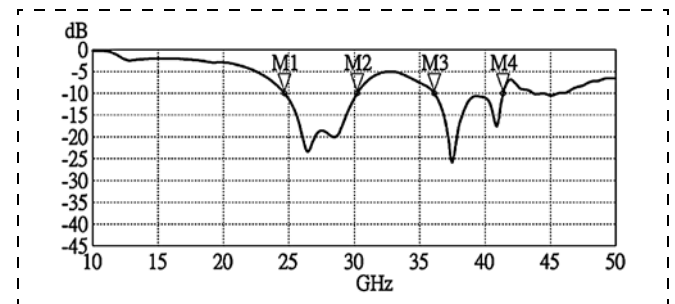
В патенте [57] предлагается вибраторный излучатель с подачей дифференциальных сигналов (рис. 73). Цифрой 5 обозначен формирователь дифференциальных сигналов, подводимых к вибратору линиями 1 и 6.

Излучатель имеет узкополосное согласование, но модификации данной структуры обеспечивают КУДН, равный 8,5 и 9,8 дБи.

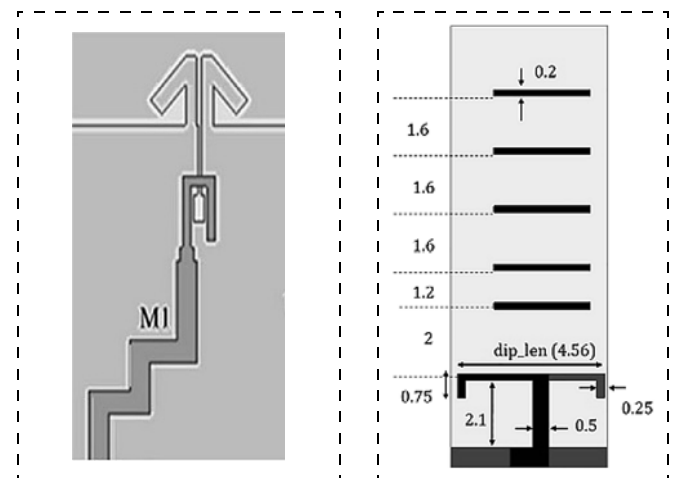
Двухслойная конструкция излучателя (рис. 74) имеет две точки подвода 2 дифференциальных сигналов к вибратору 4, который заземлен по кра-



**Рис. 67. Строение излучателя-диполя [53]**



**Рис. 68. АЧХ излучателя-диполя**



**Рис. 69. Строение антенны [54]:**  
 черный цвет — верхний слой металлизации; серый цвет — нижний слой металлизации

**Рис. 70. Строение антенны [55]**

ям линейно расположенными закоротками  $l$  [58]. Данная конструкция излучателя обеспечивает широкополосное согласование при высоком КУДН (рис. 75). Предложена модификация для круговой поляризации (рис. 76).

Вибратор (рис. 77) с обратной стороны, подобной показанному на рис. 65, *в*, обеспечивает полосу 25...30 ГГц [59].

Излучатель на основе щелей 4 с фидером 3 вида копланарной линии, показанный на рис. 78,

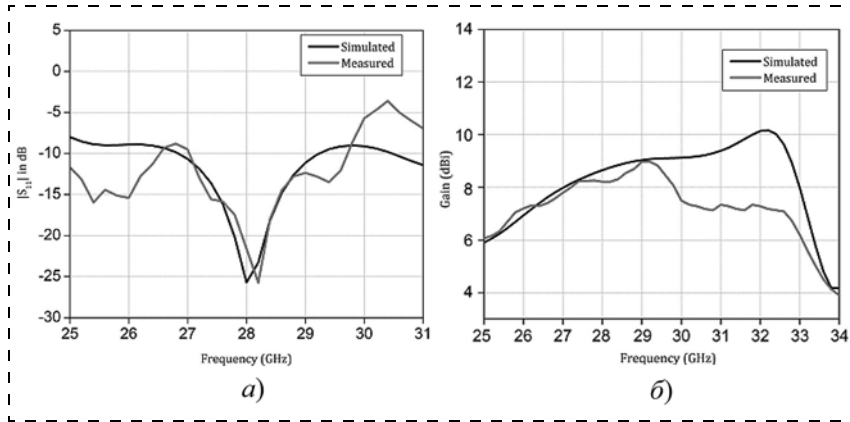


Рис. 71. АЧХ (а) и частотная зависимость КУДН (б) антенны [55]

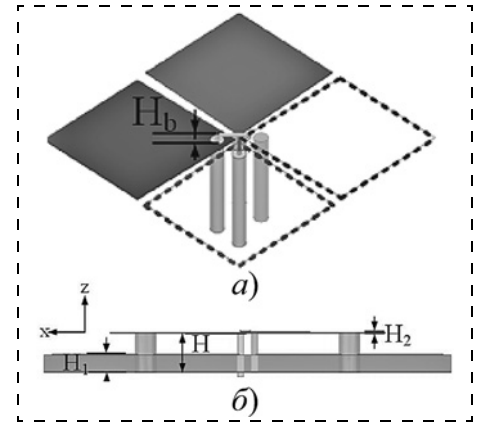


Рис. 72. Общий вид (а) и сечение (б) излучателя [56]

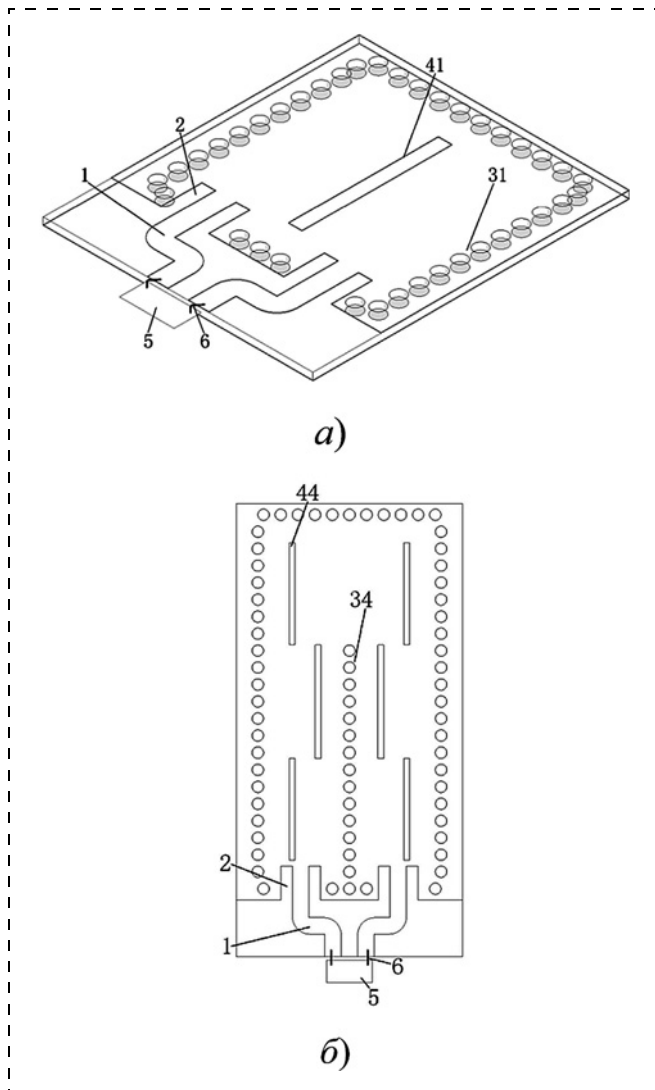


Рис. 73. Варианты строения вибраторного излучателя

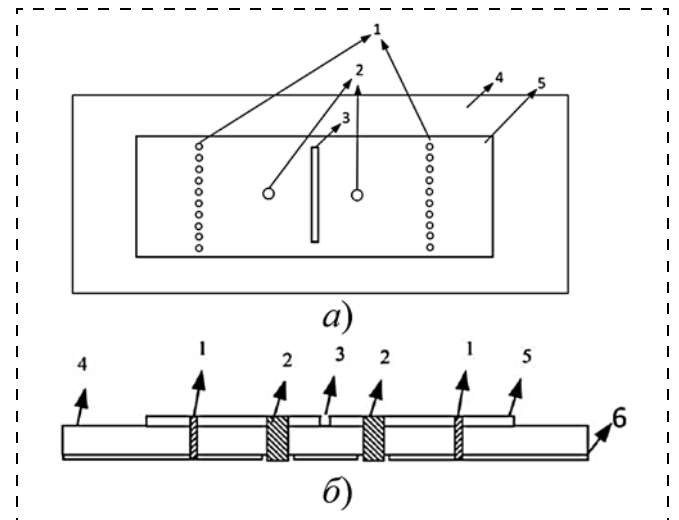


Рис. 74. Двухслойный излучатель: а — вид сверху; б — сечение

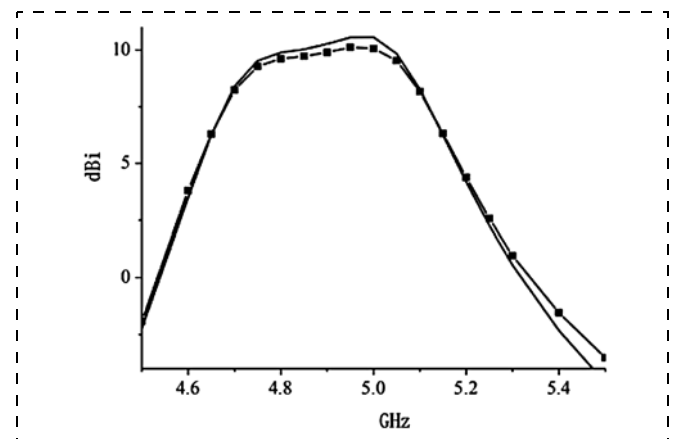


Рис. 75. Частотная зависимость КУДН излучателя

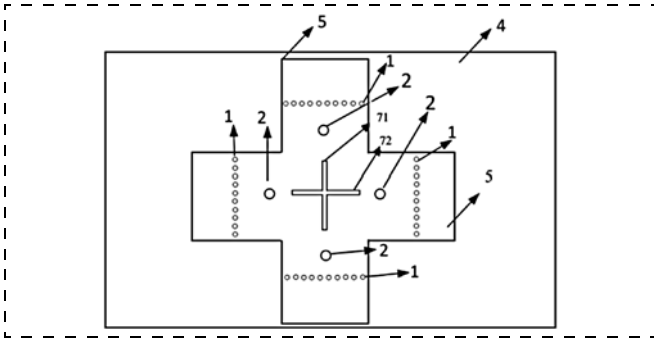


Рис. 76. Вид сверху вибратора с круговой поляризацией

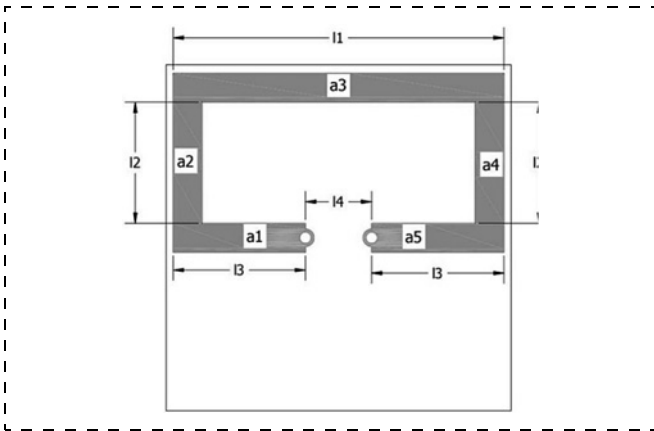


Рис. 77. Топология вибратора

описан в патенте [60]. Нижняя сторона металлизации выполнена в виде ромбовидных изолированных участков. Получено широкополосное согласование при КУДН, равном более 5 дБи (рис. 79).

Щелевой излучатель Double Exponentially Tapered Slot Antenna (DE TSA) (рис. 80), изготовленный из материала Rogers-4003 с отогнутыми (непланарными) на участке  $L_4$ ,  $L_5$  проводниками, описан в работе [61]. Получена многооктавная рабочая полоса частот 6...18 ГГц при уровне КУДН 2...4 дБи.

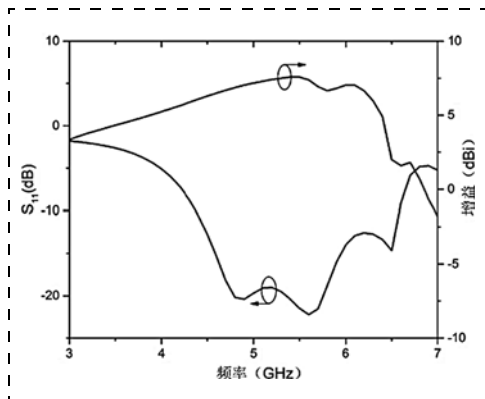


Рис. 79. АЧХ согласования и КУДН излучателя

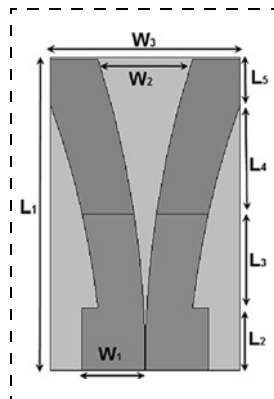


Рис. 80. Строение щелевого излучателя [61]

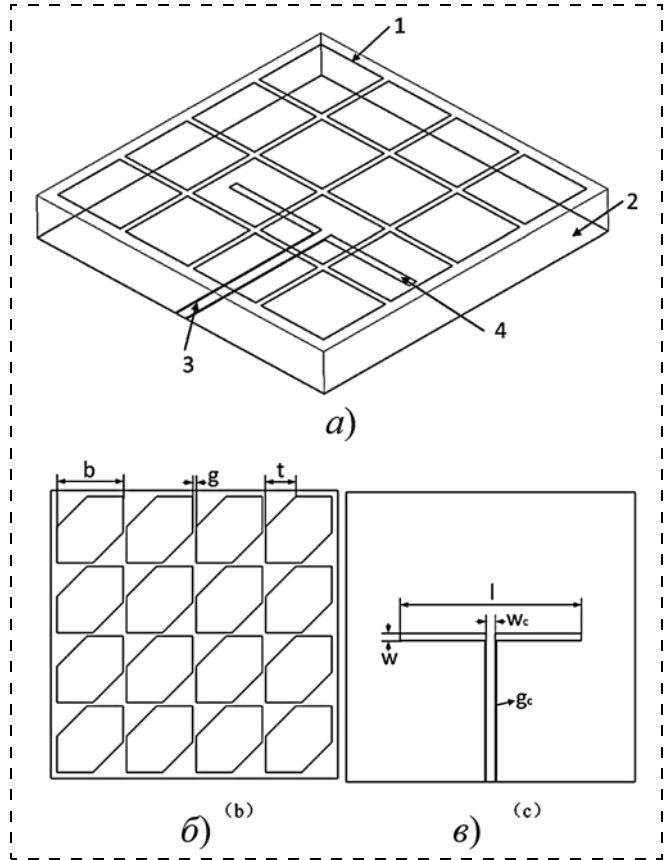


Рис. 78. Излучатель [60]:

$a$  — строение;  $b$  — верхний слой;  $c$  — нижний слой

Исследованы два варианта щелевого излучателя (рис. 81) [62]. В первом случае щель шунтируется шлейфом F1, во втором — фильтром. Наблюдается значительное различие характеристик отражения (рис. 82).

Предложена антенна Вивальди, которая дополнена изолированными металлическими включениями 5 (рис. 83) [63]. КУДН получен высоким в октавной полосе частот (рис. 84), однако не приведены размеры излучателя.

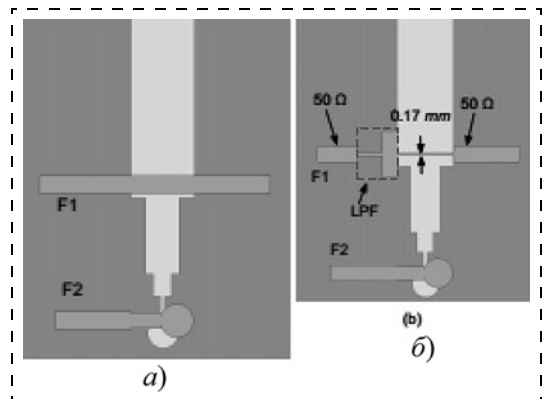


Рис. 81. Строение щелевого излучателя [62]:

$a$  — при шунтировании шлейфом;  $b$  — при шунтировании фильтром

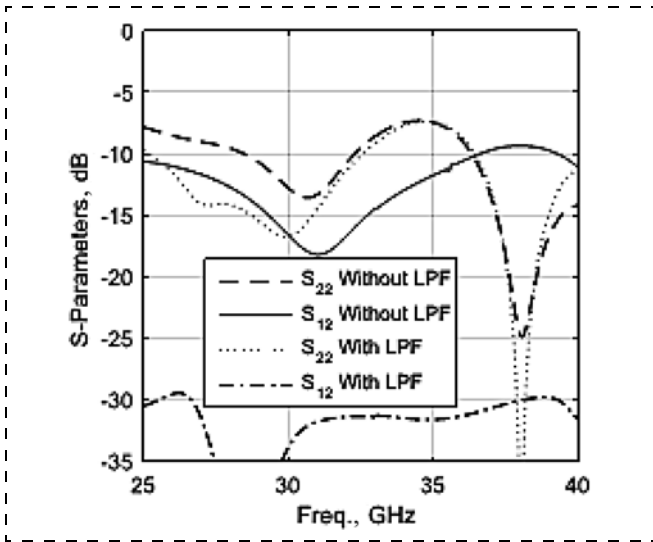


Рис. 82. АЧХ излучателя

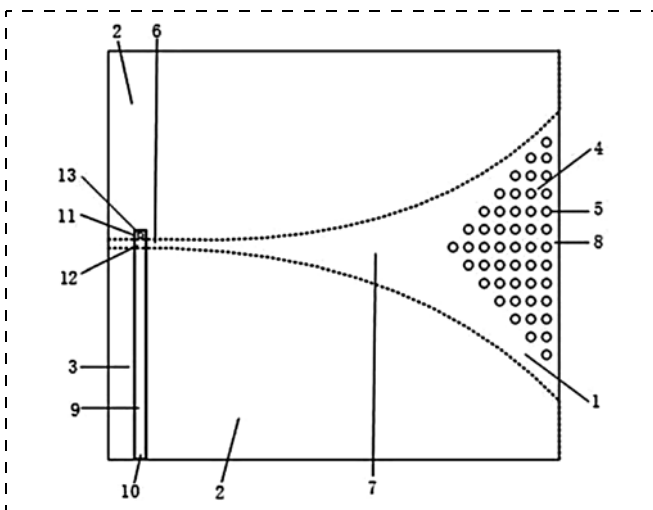


Рис. 83. Антенна Вивальди с металлическими включениями

Двухслойная реализация антенны Вивальди (рис. 85, а), описанная в патенте [64], имеет широкополосное согласование (рис. 85, б). Верхний слой выделен черным цветом, нижний — штриховкой.

Однако планарная реализация антенны Вивальди на основе ДДМ (рис. 86), описанная в патенте [65], имеет относительно узкую рабочую полосу 27...32 ГГц. На рис. 86, а представлена реализация делителя 111 и рупора 2, на рис. 86, б — подводящего фидера (щелевой линии в нижней стороне металлизации).

Согласно обзору [66] антенна типа Вивальди является самой широкополосной, разработаны образцы с рабочими полосами частот 2,6...11; 6,5...20; 23...40; 2...40 ГГц. Однако они уступают другим типам по направленности и габаритным размерам: модель с полосой 2...40 ГГц имеет размер 110 × 44 мм.

Исследована антенна Вивальди с изолированными фрагментами и вырезами (рис. 87) [67]. Для

второго излучателя (рис. 87, б) получена рабочая полоса 24,77...34,52 ГГц и КУДН = 5,00...9,53 дБи при весьма малых размерах 6,93 × 4,15 × 0,27 мм.

Модификация топологии излучателя Вивальди (рис. 88) позволила получить полосу в четыре окта-

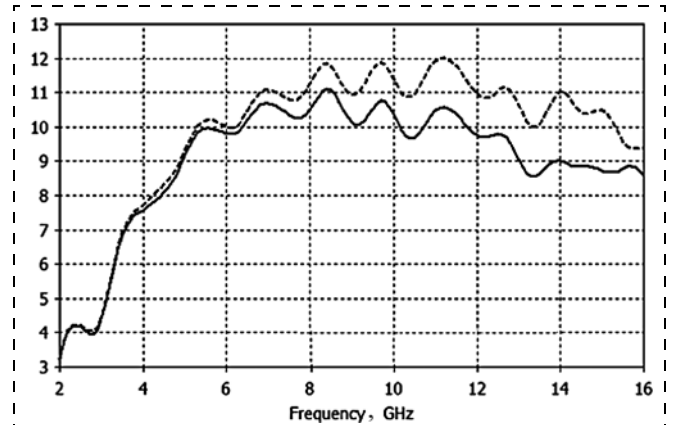


Рис. 84. Частотная зависимость КУДН излучателя

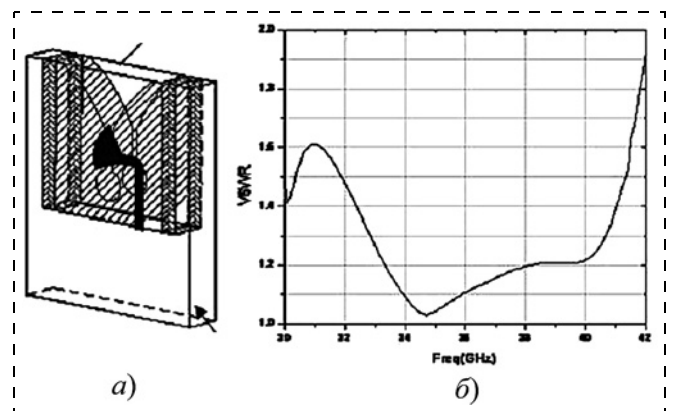


Рис. 85. Антенна Вивальди:

а — строение; б — АЧХ

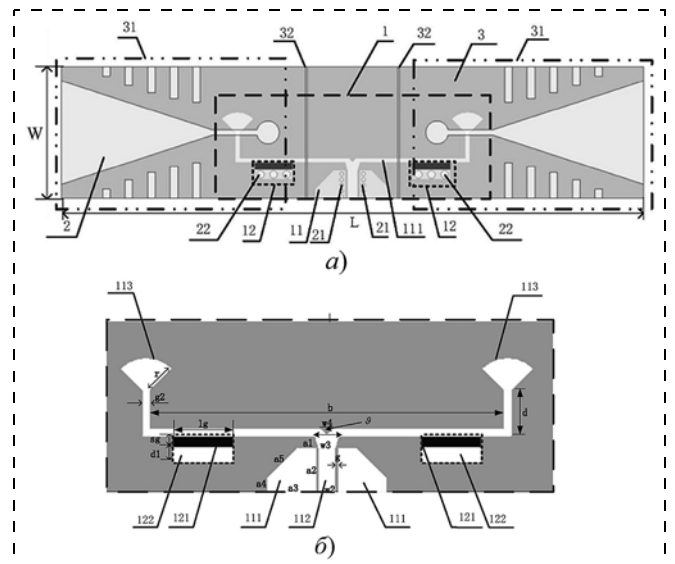


Рис. 86. Планарная реализация антенны Вивальди с делителем для двух излучателей:

а — строение; б — топология нижней стороны металлизации

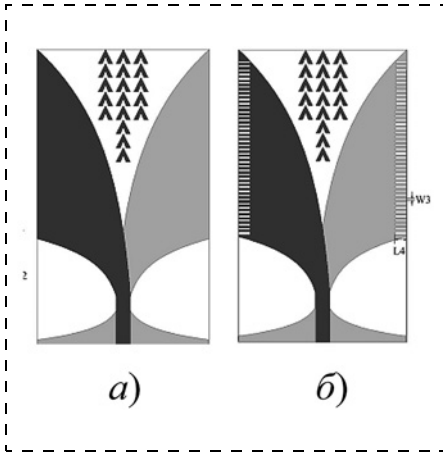


Рис. 87. Варианты антенны Вивальди

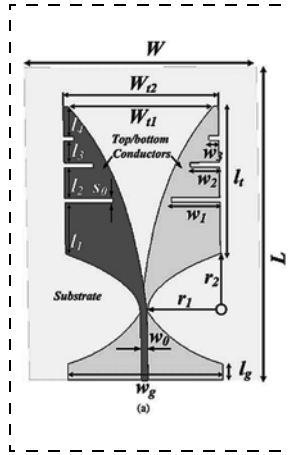


Рис. 88. Строение антенны Вивальди

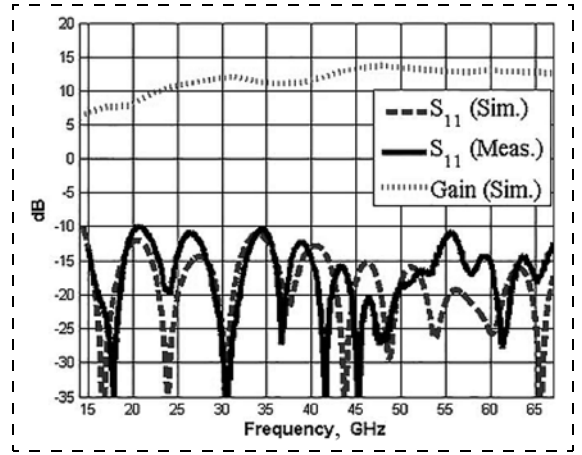


Рис. 89. АЧХ антенны Вивальди

вы (рис. 89) при размерах  $L = 32$  мм,  $W = 24$  мм [68]. Прорезы выполняют роль согласующих шлейфов.

Близкое решение описано в работе [69]. Излучатель Вивальди (рис. 90) обеспечивает рабочую полосу 25...38 ГГц с КУДН 9,5...10,5 дБи при размере  $14 \times 20$  мм.

Реализована многослойная линейная решетка излучателей типа Вивальди (*antipodal Vivaldi antenna (AVA)*), к которым сигнал подается из SIW (рис. 91) [70]. Проводники излучателей Вивальди выполнены как части верхнего и нижнего проводников SIW. При размерах  $56,0 \times 46,6$  мм для различных вариантов топологии получены частотные зависимости КУДН (рис. 92).

Антенна из четырех идентичных излучателей (рис. 93, а) защищена в патенте [71]. Сечение излучателя показано на рис. 93, б. В каждом излучателе пассивный монополь возбуждается четырьмя шлейфами 411—414. Достигнута весьма широкая полоса 24...41 ГГц.

Излучатель из трех проводящих слоев (рис. 94), разделенных диэлектриком, показал широкую полосу 24...37 ГГц (рис. 95) [72].

Антенна, состоящая из трех слоев металлизированного диэлектрика, показана на рис. 96. При этом верхний слой имеет два слоя металлизации: нижняя металлизация образует микрополосковую линию 13, в верхней металлизации выполнены две щели 12. Конструкция показала рабочую полосу частот 18...32 ГГц [73].

Развитие этой структуры добавлением нескольких щелей (рис. 97) не увеличило заметно полосу частот [74].

Монополь 4, расположенный на большом расстоянии от земляного проводника 3, в многослойной антенне (рис. 98), обеспечивает широкополосное согласование и относительно высокий КУДН в рабочей полосе (рис. 99) [75]. Межслойные соединения б играют роль металлического экрана.

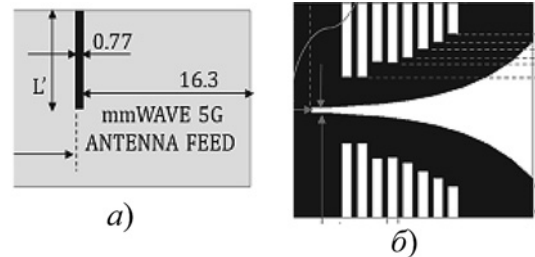


Рис. 90. Нижний (а) и верхний (б) слой металлизации излучателя Вивальди

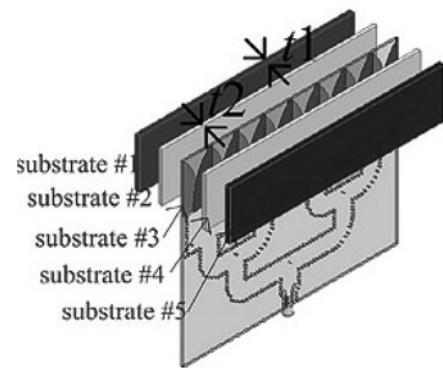


Рис. 91. Строение линейной антенной решетки

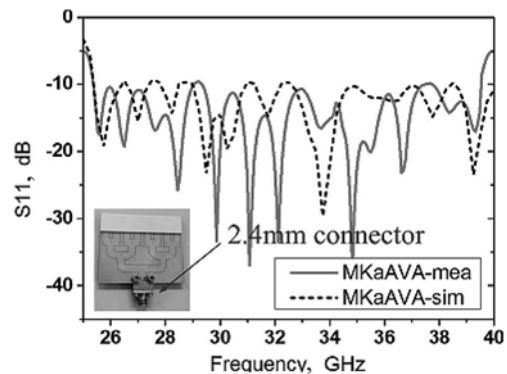


Рис. 92. АЧХ линейной антенной решетки

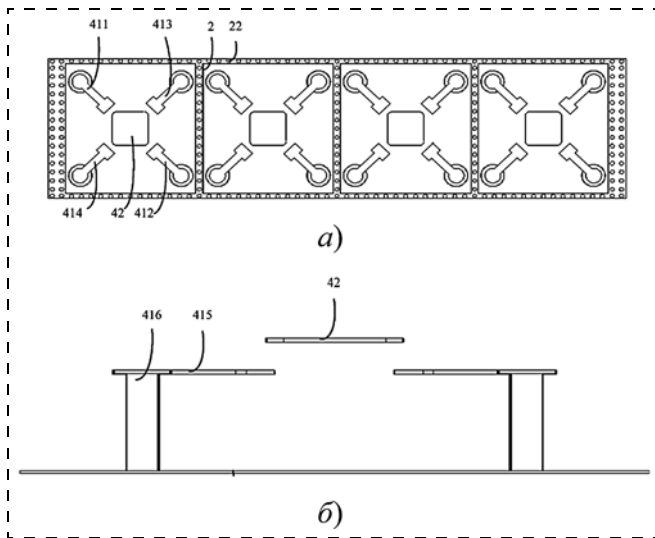


Рис. 93. Антенна из четырех излучателей:  
*a* — строение; *б* — сечение одного излучателя

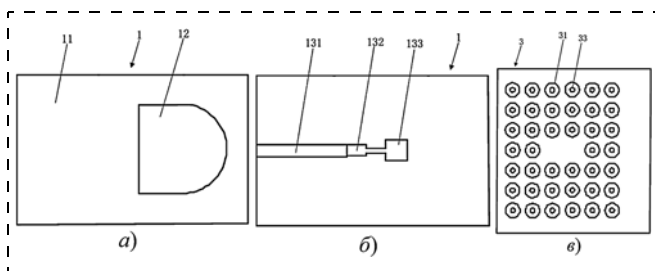


Рис. 94. Топология слоев излучателя:  
*a* — верхнего слоя; *б* — среднего слоя; *в* — нижнего слоя

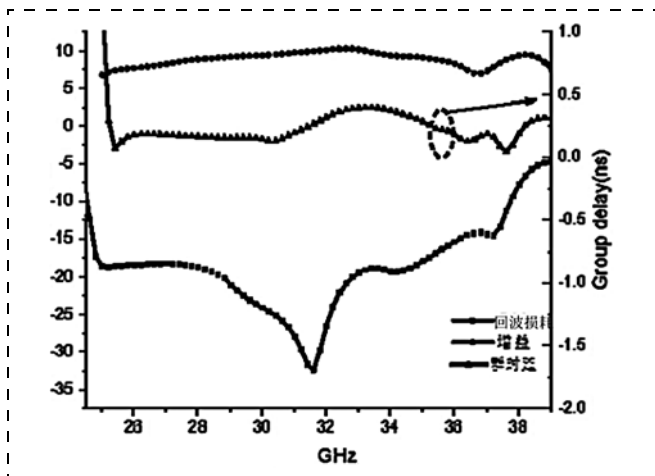


Рис. 95. АЧХ трехслойного излучателя

Излучатель, имеющий четыре активных вытянутых монополя 203, расположенных под пассивным монополем 205 (рис. 100), защищен в патенте [76]. Вид АЧХ (рис. 101) позволяет полагать, что при введении дополнительных шлейфов возможно снижение отражения ниже 10 дБ в интервале частот *b*–*c*, что позволит получить рабочую полосу 25...42 ГГц.

Модификация данного излучателя (рис. 102) описана в патенте [77]. Как видно, шлейфы-монополи имеют переменную толщину, при этом достигнута рабочая полоса 24,033...43,163 ГГц.

Предлагается двухслойная антенна (рис. 103) из пассивного монополя, расположенного над активным монополем с F-образной топологией (рис. 104). Может быть получена полоса 50...75 ГГц [78]. Од-

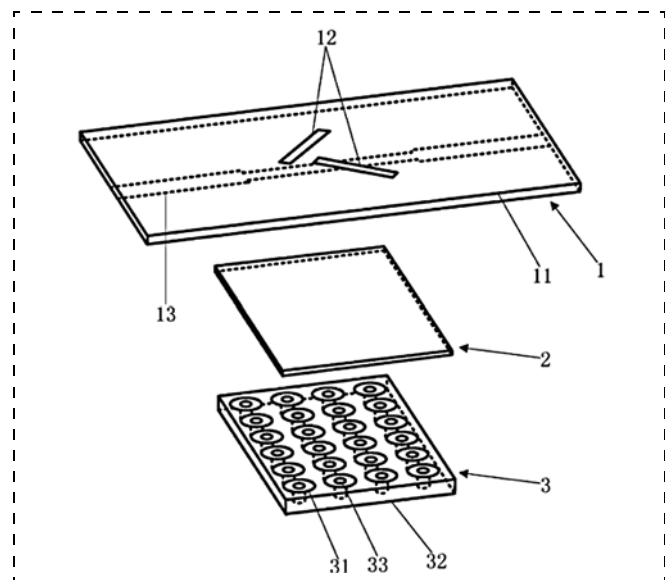


Рис. 96. Строение антенны

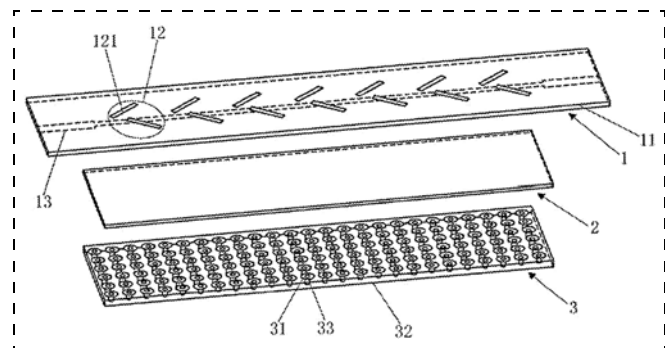


Рис. 97. Строение излучателя с несколькими щелями

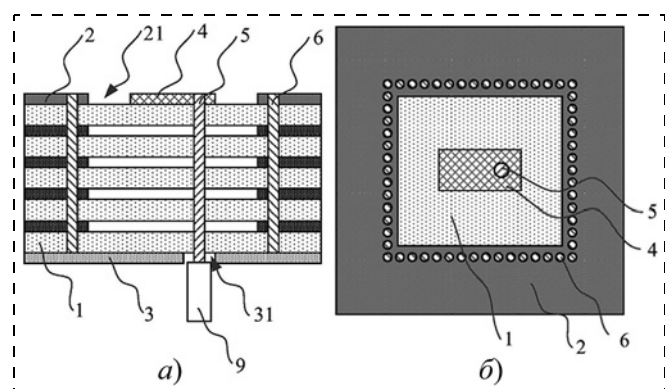


Рис. 98. Многослойная антенна:  
*a* — строение; *б* — сечение



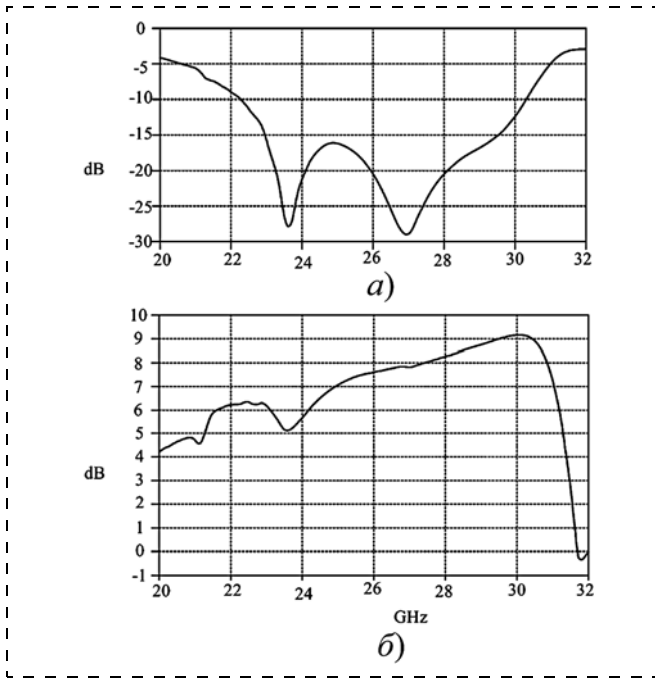


Рис. 99. Характеристики излучателя:  
*a* — АЧХ; *б* — частотная зависимость КУДН

нако введение третьего проводящего слоя, отражающего излучаемый сигнал в одну полуплоскость, требует дополнительных исследований характеристик.

Анализ и обобщение информации в области планарных сверхвысокочастотных излучающих систем указывает на следующее:

1. Развиваются все основные типы излучателей.
2. Излучатели имеют различное строение и их классифицируют по различным критериям:

- по типу;
- по форме АЧХ — с узкополосным и широкополосным характером согласования;
- по числу слоев металлизации — два слоя или более;
- по уровню КУДН.

3. Целесообразно разделять узкополосный тип согласования входа антенны с одним минимумом в частотной зависимости отражения (присущий монополю прямоугольной формы) и широкополосный тип с несколькими минимумами.

4. Монополь квадратной формы имеет узкую рабочую полосу, что стимулировало следующие модификации отдельного монополя в целях расширения полосы:

- дополнение шлейфами (см. рис. 3, 56);
- дополнение пассивными монополями (см. рис. 4);
- выполнение в нем прорезей (см. рис. 24).

Данные модификации позволяют получить широкополосный вид АЧХ и, в частности, относительную полосу частоты более 50 % (см. рис. 57).

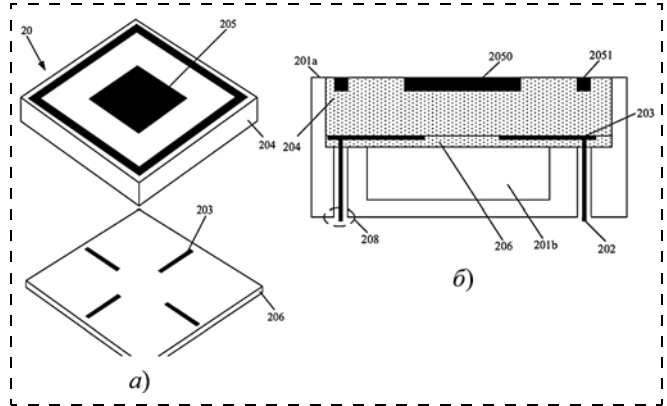


Рис. 100. Излучатель [76]:  
*a* — строение; *б* — сечение

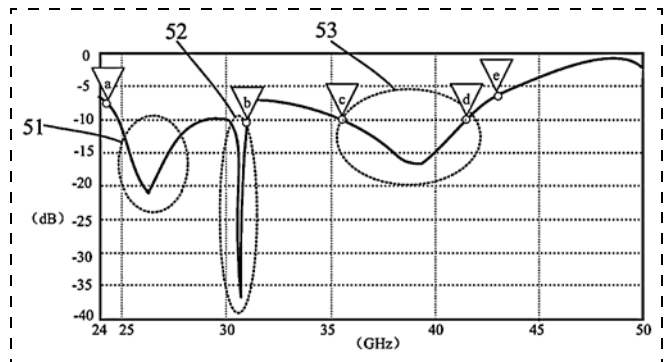


Рис. 101. АЧХ излучателя [76]

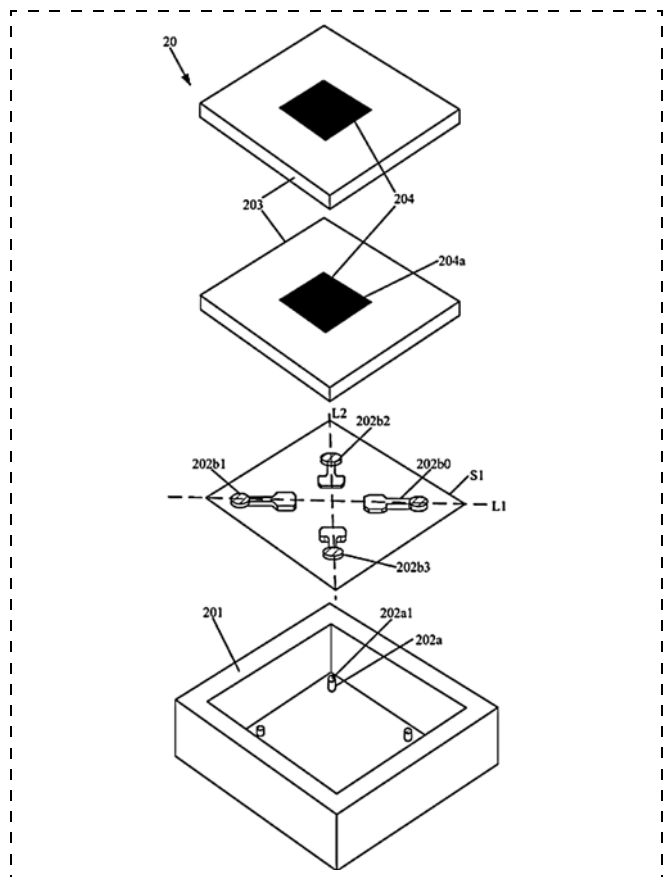


Рис. 102. Строение излучателя [77]

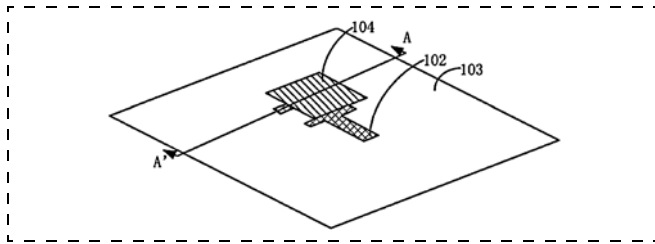


Рис. 103. Строение двухслойной антенны

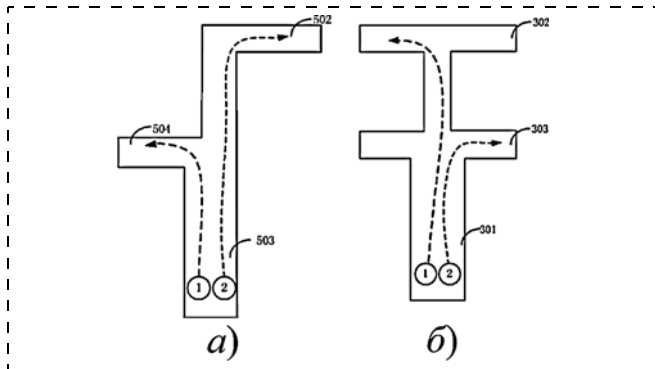


Рис. 104. Монополь:  
а, б — варианты топологии

5. Для расширения рабочей полосы предлагается формировать антенну последовательно-параллельным соединением излучателей-монопольей (см. рис. 10, 13, 16), это также приводит к широкополосному согласованию, но многократно увеличивает площадь антенны, что противоречит требованию компактности ППМ.

6. Возможны два варианта построения антенн с круговой поляризацией — использование двух излучателей (см. рис. 27) или подача в один излучатель двух сигналов (см. рис. 76), последний вариант более предпочтителен для экономии площади.

7. Излучатели на основе ДДМ просты в изготовлении, реализуются на основе полупроводниковой подложки, но, как правило, требуют большей площади, чем многослойные излучатели.

8. Целью оптимизации излучателя является достижение в заданной полосе частот максимального коэффициента усиления диаграммы направленности при минимальных габаритных размерах и требованиях технологии. В настоящее время оптимизация происходит в значительной степени эвристически — подбором топологии и параметров слоев разработчиком. Особое значение имеют вопросы широкополосности излучателя, так как именно излучатель является критическим элементом при решении задачи создания широкополосной антенны при малых габаритных размерах.

## Заключение

Прогноз развития структурных планарных излучающих систем миллиметрового диапазона за-

ключается, прежде всего, в дальнейшем повышении характеристик многослойных излучателей, реализуемых как в составе основной платы, так и в виде отдельного чипа. В то же время указанные выше излучатели на основе ДДМ представляют отдельное направление развития. Как результат развития, следует ожидать дальнейшее снижение размеров ППМ.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 19-07-00683 А.*

## Список литературы

1. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнятюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В. Обзор реализаций планарных встроенных антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 10. С. 39–46.
2. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнятюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В. Направления развития антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 11. С. 45–53.
3. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнятюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В., Бунегина С. Л., Крапухин Д. В. Обзор реализаций планарных антенн X-диапазона с двумя слоями металлизации // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 4. С. 45–54.
4. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнятюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В., Крапухин Д. В., Бунегина С. Л. Многослойные планарные антенны. Часть 1. Типы, реализации, преимущества // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 10. С. 45–54.
5. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнятюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В., Крапухин Д. В., Бунегина С. Л. Многослойные планарные антенны. Часть 2. Обеспечение многочастотного режима круговой или эллиптической поляризации // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 11. С. 46–52.
6. Kai Fong Lee, Kin-Fai Tong. Microstrip Patch Antennas, глава из книги Handbook of Antenna Technologies, под редакцией Zhi Ning Chen, Duixian Liu, Hisamatsu Nakano, Xianming Qing, Thomas Zwick. 2016. P. 787–826.
7. Elmobarak H. A., Rahim S. K. A., Abedian M., Soh P. J., Vandebosch G. A. E., Lo Y. C. Assessment of multilayered graphene technology for flexible antennas at microwave frequencies // Microwave Optical Technology Letter. 2017. N 59. P. 2604–2610.
8. Патент Китая. CN110662361A, МПК H01Q-001/32, H01Q-001/38, H05K-003/06, H05K-003/18. Embedded radar antenna PCB manufacturing process / Zhou Guoxin, Chen Wei, Tang Bingying; заявитель и патентообладатель Guangzhou TTM Electronic Technology. — CN201910962836.2A; заявл. 2019-10-11; опубл. 2020-01-07.
9. Патент Китая. CN209913029U, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-009/16, H01Q-019/06, H01Q-021/00, H01Q-021/06. High-gain log-periodic antenna based on non-resonant super-interface / Huang Jiawei, Zhai Guohua, Wang Qian, Xie Rensheng, Ding Jun; заявитель и патентообладатель EAST CHINA NORMAL UNIVERSITY. — CN201920727246.7U; заявл. 2019-05-21; опубл. 2020-01-07.
10. Патент Китая. CN109888473A, МПК H01Q-001/36, H01Q-001/48, H01Q-001/50. A kind of wideband patch antenna with chip bonding / Kong Shangcheng, Hu Sanming; заявитель и патентообладатель Southeast University (China). — CN201910091422.7A; заявл. 2019-01-30; опубл. 2019-06-14.
11. Патент США. US20170331193. МПК H01Q9/04. Circularly polarized planar aperture antenna with high gain and wide bandwidth for millimeter-wave application / Quan Xue, Shaowei Liao, Dia'aldin J. Bisharat; заявитель и патентообладатель City University of Hong Kong CityU. — US15/155,702; заявл. 2016-05-16; опубл. 2 2017-11-16.
12. Патент Китая. CN110112542. МПК H01Q1/32, H01Q1/38, H01Q1/48, H01Q3/00, H01Q5/385. A kind of encapsulating antenna for millimeter wave / Huang Hai Jin, Zhou Jiang Tao; заявитель и патентообладатель. — Hangzhou Zhongke Advanced Technology Research Institute Co., Ltd.; заявл. 2019-04-08; опубл. 2019-08-09).
13. Патент Китая. CN110391496A, МПК G01S-007/02, G01S-013/93, H01Q-001/32, H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-009/04. Antenna element, trailer-mounted radar and automobile / Zhao Yunan; заявитель FREETECH INTELLIGENT SYSTEMS; патентообладатель FREETECH HOT PLACE. — CN201910717565.4A; заявл. 2019-08-05; опубл. 2019-10-29.
14. Патент Китая. CN209282385U, МПК H01Q-001/32, H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-021/00, H01Q-021/06. A kind of string and combination fed microstrip array antenna applied to millimeter-wave radar / Wu Lei, Liu Honggang, Yuan Zhipeng; заявитель и патентообладатель WAYTHON INTELLIGENT TECHNOLOGIES SUZHOU. — CN201920223738.2U; заявл. 2019-02-22; опубл. 2019-08-20.
15. Патент Китая. CN110534923A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-021/00, H01Q-021/29. A kind of beam-shaped antenna structure and design method / Hong Wei, Yu Yingrui, Zhang Hui, Jiang Zhihao; заявитель NANJING HAWKEYE TECHNOLOGY; патентообладатель NANJING SAMPLE TECHNOLOGY. — CN201910825123.1A; заявл. 2019-09-03; опубл. 2019-12-03.
16. Патент Китая. CN110048225A, МПК H01Q-001/36, H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-021/06. Micro-strip array antenna / Peng Shusheng, Wang Jingwen, Wu Li, Liu Jun; заявитель и патентообладатель NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY. — CN201910267244.9A; заявл. 2019-04-03; опубл. 2019-07-23.

17. Патент Китая. CN208444939. МПК H01Q1/38, H01Q1/50, H01Q1/52, H01Q21/00. Series fed antenna, aerial array, paster antenna and millimeter wave antenna array sensor system / Steven Cong, Yan Tingqiang; заявитель и патентообладатель Qingdao Ruoyu Technology Co., Ltd. — CN201820515133.6U; заявл. 2018-04-11; опубл. 2019-01-29].

18. Патент Китая. CN109638437. МПК H01Q1/38, H01Q1/48, H01Q1/50, H01Q21/00, H01Q21/06, H01Q21/28. A kind of MIMO millimeter wave microstrip antenna array / Steven Cong, Yan Tingqiang; заявитель и патентообладатель Changsha Ruigan Electronic Technology Co., Ltd. — CN201811491081.4A; заявл. 2018-12-07; опубл. 2019-04-16].

19. Патент Китая. CN208299036. МПК G01S7/02, H01Q1/32, H01Q1/38, H01Q1/50, H01Q21/00, H01Q21/08. The radio-frequency front-end of microstrip crossfeed array antenna, antenna plane and radar sensor / Yi Hao, Zhou Kunming, Tan Junjie, Han Minghua; заявитель и патентообладатель Hunan Nanoradar Technology Co., Ltd. — CN201820968003.8U; заявл. 2018-06-22; опубл. 2018-12-28].

20. Патент Кореи. KR20170087778. МПК G01S13/93, G01S7/40, H01Q1/32, H01Q1/38, H01Q21/00, H01Q21/06. Antenna apparatus and automotive radar apparatus having the same / Lim Dong Uk; заявитель и патентообладатель LG Innotek Co., Ltd. — KR1020160007791A; заявл. 2016-01-21; опубл. 2017-07-31].

21. Kamiński P., Slomian I., Wincek K., Gruszczynski S. Fully Integrated, Multipurpose Low-Cost K-Band FMCW Radar Module with Sub-Millimeter Measurement Precision // International Journal of Information and Electronics Engineering. 2015. Vol. 5, N. 2. P. 74—78.

22. Kim S., Rida A., Lakafosis V., Nikolaou S., Tentzeris M. M. 77 GHz mmWave antenna array on liquid crystal polymer for automotive radar and RF front end module // ETRI Journal. 2019. Vol. 41, N. 2. P. 262—269.

23. Патент Китая. CN208239605. МПК G01S7/282; G01S7/285. Millimeter wave frequency channel quadrature doppler radar transceiver module / Yuan Lijuan, Jiang Jianwen, Xu Yajun, Wang Chengjun, Zhang Yitong; заявитель и патентообладатель Hangzhou Ruida Automobile Technology Co., Ltd. — CN201820915775.5U; заявл. 2018-06-13; опубл. 2018-12-14.

24. Jilani S. F., Abbasi Q. H., Khan Z. U., Loh T.-H., Alomaiy A. A. Ka-band antenna based on an enhanced Franklin model for 5G cellular networks // Microwave Optical Technologies Letters. 2018. Vol. 60, No. 6. P. 1562—1566.

25. Патент Китая. CN109546300. МПК G01S13/93, G01S7/02, H01Q1/36, H01Q1/50, H01Q21/00, H01Q21/06. 24GHz micro-strip array antenna and its component, vehicle-mounted millimeter wave radar / Bai Wenjuan, Zhou Lifu; заявитель и патентообладатель Huizhou Desay SV Automotive Electronics Co., Ltd. — CN201811155666.9A; заявл. 2018-09-30; опубл. 2019-03-29.

26. Патент Китая. CN109560372. МПК H01Q1/38, H01Q1/48, H01Q1/50. A kind of circular polarization ceramic substrate microstrip antenna / Hu Xing, Huang Xinjie; заявитель и патентообладатель South China University of Technology. — CN201811274600.1A; заявл. 2018-10-30; опубл. 2019-04-02.

27. Min Joo Jeong, Niamat Hussain, Ji Woong Park, Seong Gyoon Park, Seung Yeop Rhee, Nam Kim. Millimeter wave microstrip patch antenna using vertically coupled split ring metaplate for gain enhancement // Microwave and optical technologies letters, 2019. Vol. 61, N. 10. P. 2360—2365.

28. Патент международный WO2019208100A1. МПК H01Q-001/40, H01Q-005/378, H01Q-013/08. Antenna module and communication device having said antenna module mounted thereon / TAKAYAMA, Keisei, ONAKA, Kengo, SU-DO, Kaori; заявитель и патентообладатель MURATA MANUFACTURING CO., LTD. — PCT/JP2019/013931; заявл. 2019-03-29; опубл. 2019-10-31.

29. Патент Китая. CN110380199A. МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-007/00, H01Q-021/00, H01Q-021/06, H01Q-021/30. Shared aperture dual-band array antenna based on micro-strip grid and patch / XU GUANGHUI, PENG HONGLI, ZHANG YUEPING, YIN WENYAN; заявитель и патентообладатель SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY. — CN201910539116.5A; заявл. 2019-06-20; опубл. 2019-10-25.

30. Патент Китая. CN209232958U. МПК H01Q -001/38, H01Q -001/48, H01Q -001/50, H01Q -005/10, H01Q -005/28. A kind of multiband microstrip antenna of S-band / Chi Tao, Lu Houwen, Chen Ming; заявитель и патентообладатель Shanghai Ocean University. — CN201920103085.4U; заявл. 2019-01-22; опубл. 2019-08-09.

31. Патент Японии JP2018082277A, МПК H01Q-001/38, H01Q-005/378, H01Q-013/08, H01Q-021/24. Antenna device / OSAI HIDENORI, IKEDA MASAKAZU, MUTO KATSUHIKO; заявитель и патентообладатель DENSO. — JP2016222621A; заявл. 2016-11-15; опубл. 2018-05-24.

32. Патент Китая. CN109330803A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-019/02. Low radar scattering cross section microstrip antenna / WENG XIAOLONG, ZHANG HONGYUAN, LUO WEI, CHEN HAIYAN, HE WENTAO, WU XUEYU, HOU KAIQIANG, QI LUN, LI KAI, WEI BIAO, DUAN WEI; заявитель и патентообладатель UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE & TECHNOLOGY OF CHINA. — CN201910245546.6A; заявл. 2019-03-28; опубл. 2019-05-31.

33. Патент Китая. CN110600871A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-021/00. Microstrip plane antenna / WANG RONGQING; заявитель и патентообладатель NINGBO LEXING INDUCTOR ELECTRONIC. — CN201910612916.5A; заявл. 2019-07-09; опубл. 2019-12-20.

34. Патент Китая. CN110676576A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-001/52, H01Q-015/24, H01Q-021/00, H01Q-021/06. Dual-polarized microstrip antenna / DING QINGLONG, FENG HAIGANG, ZHANG NING, TAN Yulin, DAI SITE; заявитель RADIAWAVE TECHNOLOGIES; патентообладатель RADIAWAVE TECH. — CN201910956146.6A; заявл. 2019-10-09; опубл. 2020-01-10.

35. Патент США US9257751B2, МПК H01Q 009/04, H01Q 001/50. Integration of microstrip antenna with CMOS transceiver / Gordana Felic, Stan Skafidas; заявитель NITERO Pty Ltd., патентообладатель AMD Far East Ltd., Advanced Micro Devices Inc. — US12/920,053; заявл. 2009-03-13; опубл. 2016-02-09.

36. Патент международный WO2018180035. МПК H01Q1/38; H01Q13/08. Planar antenna and wireless module / Shimura Tatsuhiko, Katsura Isao; заявитель

и патентообладатель Sumitomo Electric Industries, Ltd. — JP2018006199A; заявл. 2018-02-21; опубл. 2020-02-06.

37. Патент Китая. CN209516013. МПК H01Q 1/38, H01Q 1/48, H01Q 1/50, H01Q 5/10, H01Q 5/335. A kind of wideband filtered paster antenna based on partially reflecting surface / Xiang Kairan, Chen Fuchang; заявитель и патентообладатель South China University of Technology — CN201920352456.U; заявл. 2019-03-20; опубл. 2019-10-18.

38. Патент США US20170331180. МПК G01S13/93, H01Q1/32, H01Q1/38, H01Q21/06, H01Q21/30. Antenna unit with anti-feed power divider function and array module thereof / Ching-Han Tsai; заявитель и патентообладатель Cubtek Inc. — US15/590,592; заявл. 2017-05-09; опубл. 2017-11-16.

39. Патент международный WO2019142409. МПК H01Q1/38, H01Q1/40, H01Q13/08, H01Q21/06. Antenna / Hasegawa Yuta, Guan Ning; заявитель и патентообладатель Fujikura Co., Ltd. — PCT/JP2018/037375; заявл. 2018-10-05; опубл. 2019-07-25.

40. Патент США US20070194978A1, МПК GOIS 013/62. Uwb short-range radar / Tasuku Teshirogi, Sumio Saito, Masaharu Uchino, Masanori Ejima; заявитель и патентообладатель Anritsu Corp Panasonic Corp. — US10/593,539; заявл. 2006-01-27; опубл. 2007-08-23.

41. Mahmoud K. R., Montaser A. M. Optimised 4×4 millimetre-wave antenna array with DGS using hybrid ECF0-NM algorithm for 5G mobile networks / IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2017. Vol. 11, P. 1516—1523.

42. Yahya M. S., Rahim S. K. A. 15 GHz GRID ARRAY ANTENNA FOR 5G MOBILE COMMUNICATIONS SYSTEM // Microwave and optical technology letters. 2016. Vol. 58, N. 12. P. 2977—2980.

43. Mingjian Li, Kwai-Man Luk. Low-Cost Wideband Microstrip Antenna Array for 60-GHz Applications // IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION. 2014. Vol. 62, N. 6, P. 3012—3018.

44. Byungje Lee, Yonghyun Yoon. Low Profile, Low Cost, Broadband Millimeter-Wave Antenna Array for High Data Rate WPAN Systems // IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS. 2017. Vol. 16, P. 1957—1960.

45. Desai A., Upadhyaya T., Patel R. Compact wideband transparent antenna for 5G communication systems // Microwave and Optical Technology Letters. 2019. Vol. 61, N. 3. P. 781—786.

46. Hill T. A., Kelly J. R. 28 GHz Taylor feed network for sidelobe level reduction in 5G phased array antennas // Microwave and Optical Technology Letters. 2018. Vol. 61, N. 1. P. 37—43.

47. Патент Китая. CN110224215A, МПК H01Q-001/22, H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-001/52, H01Q-021/00, H01Q-023/00. A kind of millimeter wave antenna battle array and the integrated electronic equipment of radio frequency front-end devices / ZHU DEJIN; заявитель и патентообладатель TIANTONG KAIMEI MICROELECTRONICS. — CN201910491792.XA; заявл. 2019-06-06; опубл. 2019-10-10.

48. Патент Китая. CN110165396A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-013/24. Sparse type dielectric-rod antenna based on 3D printing / ZHANG LI, WEN JINGXUAN, WENG ZIBIN, ZHANG YIXUAN, JIAO YONGCHANG, ZHAO GANG; заявитель и патентообладатель XIDIAN UNIVERSITY. — CN201910421782.9A; заявл. 2019-05-21; опубл. 2019-08-23.

49. Патент США US20180011180. МПК G01S13/06, G01S13/32, G01S13/93, G01S7/35, H01Q3/34, G01S13/02. Phased array radar systems for small unmanned aerial vehicles / Karl Foster Warnick, Jonathan Cullinan Spencer; заявитель и патентообладатель Brigham Young University. — US15/215,333; заявл. 2016-07-20; опубл. 2018-01-11.

50. Ullah H., Tahir F. A. A High Gain and Wideband Narrow-Beam Antenna for 5G Millimeter-Wave Applications // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 29430—29434.

51. Патент Китая. CN110212296A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-009/28. Three-dimensional dipole antenna array element applied to 5g millimeter waves / Zhang Wei, Liu Xiubo; заявитель и патентообладатель TIANJIN UNIVERSITY. — CN201910520134.9A; заявл. 2019-06-17; опубл. 2019-09-06.

52. Патент Китая. CN110289490A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-009/16, H01Q-021/00. A kind of round stage three-dimensional doublet bay applied to 5G millimeter wave / Zhang Wei, Liu Xiubo; заявитель и патентообладатель TIANJIN UNIVERSITY. — CN201910523910.0A; заявл. 2019-06-17; опубл. 2019-09-27.

53. Патент Китая. CN110635234A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-005/20, H01Q-005/314. Antenna structure / Su Yousheng, You Shunquan, Qiu Hongwei, Jian Ruizhi; заявитель HUANHONG ELECTRONIC, патентообладатель Tailong Electronic Kunshan. — CN201910906059.XA; заявл. 2019-09-24; опубл. 2019-12-31.

54. Madhav B. T. P., Usha Devi Y., Anilkumar T. Defected ground structured compact MIMO antenna with low mutual coupling for automotive communications // Microwave and Optical Technology Letters. 2019. Vol. 61, N. 3, P. 794—800.

55. Karthikeya G. S., Koul S. K., Poddar A. K., Rohde U. Ultra-compact orthogonal pattern diversity antenna module for 5G smartphones // Microwave and Optical Technology Letters, 2020, <https://doi.org/10.1002/prop.32378>

56. Shi J., Zhai H., Li H. A low profile dual-polarized antenna with cross-polarization enhancement // Microwave and Optical Technology Letters. 2020. Vol. 62, no. 5. P. 1997—2003.

57. Патент Китая. CN110061357A, МПК H01Q-013/18, H01Q-001/50, H01Q-001/38. A kind of ipsilateral differential feed formula chip integrated waveguide slot antenna / Ye Kai, Kong Shangcheng, Hu Sanming; заявитель и патентообладатель Southeast University (China). — CN201910383459.7A; заявл. 2019-05-09; опубл. 2019-07-26.

58. Патент Китая. CN110707426A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/50. Broadband high-gain compression high-order mode dual-polarized differential antenna loaded with via holes / LUO YU, LAI JINGYU, AN WENXING, MA KAI XUE; заявитель и патентообладатель TIANJIN UNIVERSITY. — CN201911035941.8A; заявл. 2019-10-29; опубл. 2020-01-17.

59. Патент Китая. CN110444872A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-007/00, H01Q-021/00. A kind of broadband three-dimensional spatial folding antenna applied to millimeter wave / ZHANG WEI, LIU

MEISHAN, LIU XIUBO; заявитель и патентообладатель TIANJIN UNIVERSITY. — CN201910614215.5A; заявл. 2019-07-09; опубл. 2019-11-12.

60. Патент Китая CN109841965A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-009/04, H01Q-021/06. A kind of super skin antenna of broadband multi-resonant low section of directed radiation / Yang Wanchen, Zhou Chenyu, Che Wenquan, Xue Quan, Liao Shaowei, Chen Si; заявитель и патентообладатель South China University of Technology. — CN201910170351.XA; заявл. 2019-03-07; опубл. 2019-06-04.

61. Arezoomand A. S., Sadeghzadeh R. A., Naser-Moghadasi M. Novel techniques in tapered slot antenna for linearity phase center and gain enhancement // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2016. Vol. 16. P. 270–273.

62. Al Abbas E., Ikram M., Mobashsher A. T., Abbosh A. MIMO Antenna System for Multi-Band Millimeter-Wave 5G and Wideband 4G Mobile Communications // IEEE Access Special Section on Antenna and Propagation for 5G and Beyond. 2019. Vol. 7. P. 181916–181923.

63. Патент Китая CN110190393A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-013/08, H01Q-015/02, H01Q-019/06. The high-gain tapered slot antenna of metal cylindrical lens load / Yang Mei, Cheng Chonghu, Liu Leilei; заявитель и патентообладатель NANJING UNIVERSITY OF POSTS & TELECOMMUNICATIONS. — CN201910560825.1A; заявл. 2019-06-26; опубл. 2019-08-30.

64. Патент Китая CN209880811U, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-013/08, H01Q-019/18, H01Q-021/06. Ka frequency band broadband antenna based on LTCC and array thereof / Huang Yong, Zhang Xiaopeng, Zhou Li, Wang Jie, Wang Bo; заявитель и патентообладатель Suzhou Bohai Chuangye Micro System. — CN201921078538.9U; заявл. 2019-07-11; опубл. 2019-12-31.

65. Патент Китая CN110444874A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-003/00, H01Q-013/08. Millimeter wave directional diagram reconstructable aerial based on graphene / Wu BianN, Lu Xinlei, Fan Chi, Zhao Yutong, Hu Yue; заявитель и патентообладатель XIDIAN UNIVERSITY. — CN201910680260.0A; заявл. 2019-07-26; опубл. 2019-11-12.

66. Dixit A. S., Kumar S. A Survey of Performance Enhancement Techniques of Antipodal Vivaldi Antenna // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 45774–45796.

67. Dixit A. S., Kumar S. The enhanced gain and cost-effective antipodal Vivaldi antenna for 5G communication applications // Microwave and Optical Technology Letters. 2020. Vol. 62, N. 6. P. 2365–2374.

68. Ashraf M. A., Irfan Memon I., Alshebeili S. A. Design and analysis of broadband antipodal Vivaldi antenna for radio over fiber systems // Microwave and Optical Technology Letters. 2017. Vol. 59, N. 6. P. 1441–1446.

69. Magray M. I., Karthikeya G. S., Muzaffar K., Koul S. K. Corner Bent Integrated Design of 4G LTE and mm Wave 5G Antennas for Mobile Terminals // Progress In Electromagnetics Research M. 2019. Vol. 84. P. 167–175.

70. Li X., Li Y., Li Z., Kong Q., Wang H., Lv G. Wideband high-gain SIW-fed antenna array for mm-Wave applications // Microwave and Optical Technology Letters. 2020. Vol. 62, N. 3. P. 1341–1351.

71. Патент Китая CN110649376A, МПК H01Q-001/22, H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-001/52, H01Q-005/10, H01Q-005/364, H01Q-021/00, H01Q-021/08. Antenna and electronic equipment / Huang Huanqu, Wang Yijin, Zhu Zhimin, Jian Xianjing; заявитель Vivo Mobile Communication, патентообладатель BVK Communication Technology. — CN201910844037.5A; заявл. 2019-09-06; опубл. 2020-01-03.

72. Патент Китая CN209571548U, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-013/10. Isgw ultra-wideband antenna / Shen Dongya, Liu Zhiyu, Yuan Hong; заявитель и патентообладатель Yunnan University. — CN201920474778.4U; заявл. 2019-04-10; опубл. 2019-11-01.

73. Патент Китая CN209571548U, МПК H01Q-001/36, H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-013/10, H01Q-021/06. A kind of microstrip type ISGW circular polarisation gap travelling-wave aerial / Shen Dongya, Wang Yian; заявитель и патентообладатель Yunnan University. — CN201920490839.6U; заявл. 2019-04-12; опубл. 2019-11-01.

74. Патент Китая CN209571548U, МПК H01Q-001/36, H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-013/10, H01Q-021/06. A kind of ISGW circular polarization gap traveling-wave array antenna / Shen Dongya, Wang Yian; заявитель и патентообладатель Yunnan University. — CN201920491054.0U; заявл. 2019-04-12; опубл. 2019-11-05.

75. Патент Китая CN110676578A, МПК H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-009/04. Millimeter wave antenna and electronic device / YU SHENWU; заявитель GUANGDONG OPPO MOBILE TELECOMMUNICATIONS, патентообладатель BVK ELECTRONICS. — CN201910995132.5A; заявл. 2019-10-18; опубл. 2020-01-10.

76. Патент Китая CN110212283A, МПК H01Q-001/22, H01Q-001/24, H01Q-001/36, H01Q-001/44, H01Q-001/50, H01Q-005/10, H01Q-005/20, H01Q-005/307. Antenna unit and terminal equipment / JIAN XIANJING, HUANG HUANQU, WANG YIJIN; заявитель VIVO MOBILE COMMUNICATION, патентообладатель BVK COMMUNICATION TECHNOLOGY. — CN201910430964.2A; заявл. 2019-05-22; опубл. 2019-09-06.

77. Патент Китая CN110474158A, МПК H01Q-001/22, H01Q-001/24, H01Q-001/36, H01Q-001/50. A kind of antenna element and terminal device / ZHU ZHIMIN, HUANG HUANQU, WANG YIJIN; заявитель VIVO MOBILE COMMUNICATION, патентообладатель BVK COMMUNICATION TECHNOLOGY. — CN201910817646.1A; заявл. 2019-08-30; опубл. 2019-11-19.

78. Патент Китая CN110085970A, МПК H01Q-001/22, H01Q-001/36, H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-005/10, H01Q-005/371, H01Q-005/378. A kind of antenna and terminal device / LIU ZHIKAI, RAO PEIZONG; заявитель SHENZHEN JIEBAO RADIO WAVE TECHNOLOGY, патентообладатель GUANGZHOU HAIGE COMMUNICATIONS. — CN201910291033.9A; заявл. 2019-04-11; опубл. 2019-08-02.

A. P. Lisitsky<sup>1</sup>, Ph. D., Leading Researcher, RAS, liant222@yandex.ru,

P. P. Maltsev<sup>1,2</sup>, D. Sc., Scientific Director, Head of the Laboratory, isvch@isvch.ru,

O. S. Matveenko<sup>1,2</sup>, Ph. D., Leading Researcher, unicfive@yandex.ru,

A. O. Mikhalev<sup>1,2</sup>, Junior Researcher, m2lkeny@yandex.ru,

A. A. Trofimov<sup>1</sup>, Ph. D., Senior Researcher, aa-trofimov@yandex.ru,

V. R. Skrinsky<sup>2</sup>, Assistant, vlad\_ckr@mail.ru

<sup>1</sup> V. G. Mokerov Institute of ultra high frequency semiconductor of Russian academy of sciences, Moscow, 1174105, Russian Federation

<sup>2</sup> 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 1174105, Russian Federation, liant222@yandex.ru

## Trends in the Development of Planar Radiating Systems in the Millimeter Wavelength Range. Monopoles and Dipoles. Review

Received on February 09, 2021

Accepted on February 16, 2021

The classification of antennas of the millimeter wavelength range is carried out. Various design and technological bases for the implementation of antennas and their parameters are given.

**Keywords:** antenna, monopoles, dipoles, design and technological basis, millimeter wavelength range

For citation:

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.

DOI: 10.17587/nmst.23.88-112

## References

1. Maltsev P. P., Matveenko O. V., Gnatyuk D. L., Lisitskiy A. P., Fedorov Yu. V. Review of Implementation of 5 GHz Planar Dipole, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2011, no. 10, pp. 39–46 (in Russian).
2. Maltsev P. P., Matveenko O. V., Gnatyuk D. L., Lisitskiy A. P., Fedorov Yu. V. Lines of Development of 5 GHz Integrated Planar Antennas with Minimal Size, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2011, no. 11, pp. 45–53 (in Russian).
3. Maltsev P. P., Matveenko O. S., Gnatyuk D. L., Lisitskiy A. P., Fedorov Yu. V., Bunegina S. L., Krapuchin D. V. Review of Implementation of Planar X-Band Antennas with Two Metallization Layers, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 4, pp. 45–54 (in Russian).
4. Maltsev P. P., Matveenko O. S., Gnatyuk D. L., Lisitskiy A. P., Fedorov Yu. V., Krapuchin D. V., Bunegina S. L. Multilayer Planar Antennas. Part 1. Types, Realizations, Advantages, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 10, pp. 45–54 (in Russian).
5. Maltsev P. P., Matveenko O. S., Gnatyuk D. L., Lisitskiy A. P., Fedorov Yu. V., Krapuchin D. V., Bunegina S. L. Multilayer Planar Antennas. Part 2. Achievement of Dual-Frequency, Circular or Elliptical Polarized Antenna Radiation, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 11, pp. 46–52 (in Russian).
6. Kai Fong Lee, Kin-Pai Tong. Microstrip Patch Antennas, chapter from the Handbook of Antenna Technologies, edited by Zhi Ning Chen, Duixian Liu, Hisamatsu Nakano, Xianming Qing, Thomas Zwick. 2016, pp. 787–826.
7. Elmoharak H. A., Rahim S. K. A., Abedian M., Soh P. J., Vandebosch G. A. E., Lo Y. C. Assessment of multilayered graphene technology for flexible antennas at microwave frequencies, *Optical Technology Letter*, 2017, no. 59, pp. 2604–2610.
8. China Patent CN110662361A, IPC H01Q-001/32, H01Q-001/38, H05K-003/06, H05K-003/18. Embedded radar antenna PCB manufacturing process / ZHOU GUOXIN, CHEN WEI, TANG BINGYING; applicant and patent holder GUANGZHOU TTM ELECTRONIC TECHNOLOGY. — CN201910962836.2A; claimed 2019-10-11; published 2020-01-07.
9. China Patent CN209913029U, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-009/16, H01Q-019/06, H01Q-021/00, H01Q-021/06. High-gain log-periodic antenna based on non-resonant super-interface / HUANG JIAWEI, ZHAI GUOHUA, WANG QIAN, XIE RENSHENG, DING JUN; applicant and patent holder of EAST CHINA NORMAL UNIVERSITY. — CN201920727246.7U; claimed 2019-05-21; published 2020-01-07.
10. China Patent CN109888473A, IPC H01Q-001/36, H01Q-001/48, H01Q-001/50. A kind of wideband patch antenna with chip bonding / KONG SHANGCHENG, HU SANMING; applicant and patent holder of Southeast University (China). — CN201910091422.7A; application 2019-01-30; publ. 2019-06-14.
11. US Patent US20170331193, IPC H01Q9/04. Circularly polarized planar aperture antenna with high gain and wide bandwidth for millimeter-wave application / Quan Xue, Shaowei Liao, Di'aaldin J. Bisharat; applicant and patent holder of City University of Hong Kong CityU. — US15/155,702; claimed 2016-05-16; published 2 2017-11-16
12. China Patent CN110112542, IPC H01Q1/32, H01Q1/38, H01Q1/48, H01Q3/00; H01Q5/385. A kind of encapsulating antenna for millimeter wave / Huang Hai Jin, Zhou Jiang Tao; applicant and patent holder. — Hangzhou Zhongke Advanced Technology Research Institute Co., Ltd.; announced 2019-04-08; published 2019-08-09]
13. China Patent CN110391496A, IPC G01S-007/02, G01S-013/93, H01Q-001/32, H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-009/04. Antenna element, trailer-mounted radar and automobile / ZHAO YUNAN; applicant FREETECH INTELLIGENT SYSTEMS; patent holder FREETECH HOT PLACE. — CN201910717565.4A; claimed 2019-08-05; published 2019-10-29.
14. China Patent CN209282385U, IPC H01Q-001/32, H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-021/00, H01Q-021/06. A kind of string and combination fed microstrip array antenna applied to millimeter-wave radar / WU LEI, LIU HONGGANG, YUAN ZHIPENG; applicant and patent holder WAYTHON INTELLIGENT TECHNOLOGIES SUZHOU. — CN201920223738.2U; claimed 2019-02-22; published 2019-08-20.
15. China Patent CN110534923A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-021/00, H01Q-021/29. A kind of beam-shaped antenna structure and design method / HONG WEI, YU YINGRUI, ZHANG HUI, JIANG ZHIHAO; applicant NANJING HAWKEYE TECHNOLOGY; patent holder NANJING SAMPLE TECHNOLOGY. — CN201910825123.1A; claimed 2019-09-03; published 2019-12-03.
16. China Patent CN110048225A, IPC H01Q-001/36, H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-021/06. Micro-strip array antenna / PENG SHUSHENG, WANG JINGWEN, WU LI, LIU JUN; applicant and patent holder of NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY. — CN201910267244.9A; claimed 2019-04-03; published 2019-07-23.
17. China Patent CN208444939, IPC H01Q1/38, H01Q1/50, H01Q1/52, H01Q21/00. Series fed antenna, aerial array, paster antenna and millimeter wave antenna array sensor system / Steven Cong, Yan Tingqiang; applicant and patent holder Qingdao Ruoyu Technology Co., Ltd.. — CN201820515133.6U; claimed 2018-04-11; published 2019-01-29]
18. China Patent CN109638437, IPC H01Q1/38, H01Q1/48, H01Q1/50, H01Q21/00, H01Q21/06, H01Q21/28. A kind of MIMO millimeter wave microstrip antenna array / Steven Cong, Yan Tingqiang; applicant and patent holder Changsha Ruigan Electronic Technology Co., Ltd.. — CN201811491081.4A; declared 2018-12-07; published 2019-04-16]
19. China Patent CN208299036, IPC G01S7/02, H01Q1/32, H01Q1/38, H01Q1/50, H01Q21/00, H01Q21/08. The radio-frequency front-end of microstrip crossfeed array antenna, antenna plane and radar sensor / Yi Hao, Zhou Kunming, Tan Junjie, Han Minghua; applicant and patent holder Hunan Nanoradar Technology Co., Ltd.. — CN201820968003.8U; claimed 2018-06-22; published 2018-12-28]
20. Korean Patent KR20170087778, IPC G01S13/93, G01S7/40, H01Q1/32, H01Q1/38, H01Q21/00, H01Q21/06. Antenna apparatus and automotive radar apparatus having the same / Lim Dong Uk; applicant and patent holder LG Innotek Co., Ltd. — KR1020160007791A; claimed 2016-01-21; published 2017-07-31]
21. Kamiński P., Slomian I., Wincek K., Gruszczynski S. Fully Integrated, Multipurpose Low-Cost K-Band FMCW Radar Module with Sub-Millimeter Measurement Precision, *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 2015, vol. 5, no. 2, pp. 74–78.
22. Kim S., Rida A., Lakafosis V., Nikolou S., Tentzeris M. M. 77 GHz mmWave antenna array on liquid crystal polymer for automotive radar and RF front end module, *ETRI Journal*, 2019, vol. 41, no. 2, pp. 262–269.
23. China Patent CN208239605, IPC G01S7/282; G01S7/285. Millimeter wave frequency channel quadrature doppler radar transceiver module / Yuan Lijuan, Jiang Jianwen, Xu Yajun, Wang Chengjun, Zhang Yitong; applicant and patent holder Hangzhou Ruida Automobile Technology Co., Ltd.. — CN201820915775.5U; claimed 2018-06-13; published 2018-12-14.
24. Jilani S. F., Abbasi Q. H., Khan Z. U., Loh T.-H., Alomayni A. A. Ka-band antenna based on an enhanced Franklin model for 5G cellular networks, *Microwave Optical Technologies Letters*, 2018, no. 60, no. 6, pp. 1562–1566.
25. China Patent CN109546300, IPC G01S13/93, G01S7/02, H01Q1/36, H01Q1/50, H01Q21/00, H01Q21/06. 24GHz micro-strip array antenna and its component, vehicle-mounted millimeter wave radar / Bai Wenjuan, Zhou Lifu; applicant and patent holder Huizhou Desay SV Automotive Electronics Co., Ltd. — CN201811155666.9A; application 2018-09-30; publ. 2019-03-29.
26. China Patent CN109560372, IPC H01Q1/38, H01Q1/48, H01Q1/50. A kind of circular polarization ceramic substrate microstrip antenna / Hu Xing, Huang Xinjie; applicant and patent holder of South China University of Technology. — CN201811274600.1A; claimed 2018-10-30; published 2019-04-02.
27. Min Joo Jeong, Niamat Hussain, Ji Woong Park, Seong Gyoon Park, Seung Yeop Rhee, Nam Kim. Millimeter wave microstrip patch antenna using vertically coupled split ring metaplate for gain enhancement, *Microwave and Optical Technologies Letters*, 2019, vol. 61, no. 10, pp. 2360–2365.
28. Patent International WO2019208100A1, IPC H01Q-001/40, H01Q-005/378, H01Q-013/08. Antenna module and communication device having said antenna module mounted thereon / TAKAYAMA, Keisei, ONAKA, Kengo, SUDO, Kaoru; applicant and patent holder MURATA MANUFACTURING CO., LTD. — PCT/JP2019 / 013931; declared 2019-03-29; published 2019-10-31.
29. China Patent CN110380199A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-007/00, H01Q-021/00, H01Q-021/06, H01Q-021/30. Shared aperture dual-band array antenna based on micro-strip grid and patch / Xu Guanghui, Peng Hongli, Zhang Yueping, Yin Wenyang; applicant and patent holder of Shanghai Jiao Tong University. — CN201910539116.5A; application 2019-06-20; publ. 2019-10-25.
30. China Patent CN209232958U, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-005/10, H01Q-005/28. A kind of multiband microstrip antenna of S-band / Chi Tao, Lu Houwen, Chen Ming; applicant and patent holder Shanghai Ocean University. — CN201920103085.4U; application 2019-01-22; publication 2019-08-09.
31. Japanese Patent JP2018082277A, IPC H01Q-001/38, H01Q-005/378, H01Q-013/08, H01Q-021/24. Antenna device / Osai Hidenori, Ikeda Masakazu, Muto Katsuhiko; applicant and patent holder Denso. — JP2016222621A; claimed 2016-11-15; published 2018-05-24.
32. China Patent CN109830803A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-019/02. Low radar scattering cross section microstrip antenna / Weng Xiaolong, Zhang Hongyuan, Luo Wei, Chen Haiyan, He Wentao, Wu Xueyu, Hou Kaiqiang, Qi Lun, Li Kai, Wei Biao, Duan Wei; applicant and patent holder University of Electronic Science & Technology of China. — CN201910245546.6A; claimed 2019-03-28; published 2019-05-31.
33. China Patent CN110600871A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-021/00. Microstrip plane antenna / Wang Rongqing; applicant and patent holder of Ningbo Lexing Inductor Electronic. — CN201910612916.5A; Appl. 2019-07-09; publ. 2019-12-20.
34. China Patents CN110676576A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-001/52, H01Q-015/24, H01Q-021/00, H01Q-021/06. Dual-polarized microstrip antenna / Ding Qinglong, Haigang Feng, Zhang Ning, Tan Yulin, Dai Site; applicant Radiawave technologies; patent holder Radiawave Tech. — CN201910956146.6A; application 2019-10-09; publication 2020-01-10.
35. US Patent US9257751B2, IPC H01Q 009/04, H01Q 001/50. Integration of microstrip antenna with CMOS transceiver / Gordana Felic, Stan Skafidas; applicant NITERO Pty Ltd., patent holder AMD Far East Ltd., Advanced Micro Devices Inc. — US12/920,053; application 2009-03-13; publ. 2016-02-09.
36. Patent international WO2018180035, IPC H01Q1 / 38; H01Q13/08. Planar antenna and wireless module / Shimura Tatsuhiro, Katsura Isao; applicant and patent holder Sumitomo Electric Industries, Ltd. — JP2018006199A; application 2018-02-21; publ. 2020-02-06.
37. China Patent CN209516013, IPC H01Q 1/38, H01Q 1/48, H01Q 1/50, H01Q 5/10, H01Q 5/335. A kind of wideband filtered paster antenna based on partially reflecting surface / Xiang Kairan, Chen Fuchang; applicant and patent holder South China University of Technology — CN201920352456.U; claimed 2019-03-20; published 2019-10-18.
38. US Patent US20170331180, IPC G01S13/93, H01Q1/32, H01Q1/38, H01Q21/06, H01Q21/30. Antenna unit with anti-feed power divider function and array module thereof / Ching-Han Tsai; applicant and patentee Cubtek Inc. — US15/590,592; Appl. 2017-05-09; publ. 2017-11-16.
39. International Patent WO2019142409, IPC H01Q1/38, H01Q1/40, H01Q13/08, H01Q21/06. Antenna / Hasegawa Yuta, Guan Ning; applicant and patentee Fujikura Co., Ltd. — PCT/JP2018/037375; declared 2018-10-05; published 2019-07-25.
40. US Patent US20070194978A1, IPC GOIS 013/62. Uwb short-range radar / Tasuku Teshirogi, Sumio Saito, Masaharu Uchino, Masanori Ejima; appli-

cant and patent holder Anritsu Corp Panasonic Corp. — US10/593,539; claimed 2006-01-27; published 2007-08-23.

41. **Mahmoud K. R., Montaser A. M.** Optimized 4×4 millimetre-wave antenna array with DGS using hybrid ECFO-NM algorithm for 5G mobile networks, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2017, vol. 11, no. 11, pp. 1516–1523.
42. **Yahya M. S., Rahim S. K. A.** 15 GHz Grid array antenna for 5g mobile communications system, *Microwave and optical technology letters*, 2016, vol. 58, no. 12, pp. 2977–2980.
43. **Mingjian Li, Kwai-Man Luk.** Low-Cost Wideband Microstrip Antenna Array for 60-GHz Applications, *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2014, vol. 62, no. 6, pp. 3012–3018.
44. **Byungie Lee, Yonghyun Yoon.** Low Profile, Low Cost, Broadband Millimeter-Wave Antenna Array for High Data Rate WPAN Systems, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, vol. 16, pp. 1957–1960.
45. **Desai A., Upadhyaya T., Patel R.** Compact wideband transparent antenna for 5G communication systems, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, vol. 61, no. 3, pp. 781–786.
46. **Hill T. A., Kelly J. R.** 28 GHz Taylor feed network for sidelobe level reduction in 5G phased array antennas, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, vol. 61, no. 1, pp. 37–43.
47. **China Patent** CN110224215A, IPC H01Q-001/22, H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-001/52, H01Q-021/00, H01Q-023/00. A kind of millimeter wave antenna battle array and the integrated electronic equipment of radio frequency front-end devices / Zhu Dejin; the applicant and patent holder Tiantong Kaimei Microelectronics. — CN201910491792. XA; claimed 2019-06-06; published 2019-09-10.
48. **China Patent** CN110165396A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-013/24. Sparse type dielectric-rod antenna based on 3D printing / Zhang Li, Wen Jingxuan, Weng Zibin, Zhang Yixuan, Jiao Yongchang, Zhao Gang.; applicant and patent holder Xidian University. — CN201910421782. 9A; declared 2019-05-21; published 2019-08-23.
49. **US Patent** US20180011180. IPC G01S13/06, G01S13/32, G01S13/93, G01S13/35, H01Q3/34, G01S13/02. Phased array radar systems for small unmanned aerial vehicles / Karl Foster Warnick, Jonathan Cullinan Spencer; applicant and patent holder Brigham Young University. — US15/215,333; declared 2016-07-20; published 2018-01-11.
50. **Ullah H., Tahir F. A.** A High Gain and Wideband Narrow-Beam Antenna for 5G Millimeter-Wave Applications, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, P. 29430–29434.
51. **China Patent** CN110212296A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-009/28. Three-dimensional dipole antenna array element applied to 5g millimeter waves / Zhang Wei, Liu Xiubo; applicant and patent holder TIANJIN UNIVERSITY. — CN201910520134.9A; claimed 2019-06-17; published 2019-09-06.
52. **China Patent** CN110289490A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-009/16, H01Q-021/00. A kind of round stage three-dimensional doublet bay applied to 5G millimeter wave / Zhang Wei, Liu Xiubo; applicant and patent holder of Tianjin University. — CN201910523910. 0A; declared 2019-06-17; published 2019-09-27.
53. **China Patent** CN110635234A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-005/20, H01Q-005/314. Antenna structure / Su Yousheng, You Shunquan, Qiu Hongwei, Jian Ruizhi.; applicant Huanhong Electronic, patent holder Tailong Electronic Kunshan. — CN201910906059.XA; claimed 2019-09-24; published 2019-12-31.
54. **Madhav B. T. P., Usha Devi Y., Anilkumar T.** Defected ground structured compact MIMO antenna with low mutual coupling for automotive communications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, vol. 61, no. 3, pp. 794–800.
55. **Karthikeya G. S., Koul S. K., Poddar A. K., Rohde U.** Ultra-compact orthogonal pattern diversity antenna module for 5G smartphones, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, <https://doi.org/10.1002/mop.32378>
56. **Shi J., Zhai H., Li H.** A low profile dual-polarized antenna with cross-polarization enhancement, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, vol. 62, no. 5, pp. 1997–2003.
57. **China Patent** CN110061357A, IPC H01Q-013/18, H01Q-001/50, H01Q-001/38. A kind of ipsilateral differential feed formula chip integrated waveguide slot antenna / Ye Kai, Kong Shangcheng, Hu Sanming; applicant and patent holder Southeast University (China). — CN201910383459. 7A; claimed 2019-05-09; published 2019-07-26.
58. **China Patent** CN110707426A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/50. Broadband high-gain compression high-order mode dual-polarized differential antenna loaded with via holes / Luo Yu, Lai Jingyu, An Wenxing, Ma Kaixue; applicant and patent holder Tianjin University. — CN201911035941.8A; declared 2019-10-29; published 2020-01-17.
59. **China Patent** CN110444872A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-007/00, H01Q-021/00. A kind of broadband three-dimensional spatial folding antenna applied to millimeter wave / Zhang Wei, Liu Meishan, Liu Xiubo; applicant and patent holder Of Tianjin University. — CN201910614215. 5A; claimed 2019-07-09; published 2019-11-12.
60. **China Patent** CN109841965A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-009/04, H01Q-021/06. A kind of super skin antenna of broadband multi-resonant low section of directed radiation / Yang Wanchen,

Zhou Chenyu, Che Wenquan, Xue Quan, Liao Shaowei, Chen Si; applicant and patent holder of South China University of Technology. — CN201910170351.XA; declared 2019-03-07; published 2019-06-04.

61. **Arezoomand A. S., Sadeghzadeh R. A., Naser-Moghadasi M.** Novel techniques in tapered slot antenna for linearity phase center and gain enhancement, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, vol. 16, pp. 270–273.
62. **Abbas E. A., Ikram M., Mobashsher A. T., Abhosh A.** MIMO Antenna System for Multi-Band Millimeter-Wave 5G and Wideband 4G Mobile Communications, *IEEE Access Special Section on Antenna and Propagation for 5G and Beyond*, 2019, vol. 7, pp. 181916–181923.
63. **China Patent** CN110190393A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-013/08, H01Q-015/02, H01Q-019/06. The high-gain tapped slot antenna of metal cylindrical lens load / Yang Mei, Cheng Chonghu, Liu Leilei; applicant and patent holder of Nanjing University Of Posts & Telecommunications. — CN201910560825.1A; claimed 2019-06-26; published 2019-08-30.
64. **China Patent** CN209880811U, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-013/08, H01Q-019/18, H01Q-021/06. Ka frequency band broadband antenna based on LTCC and array therefor / HUANG YONG, ZHANG XIAOPENG, ZHOU LI, WANG JIE, WANG BO.; applicant and patent holder SUZHOU BOHAI CHUANGYE MICRO SYSTEM. — CN201921078538. 9U; claimed 2019-07-11; published 2019-12-31.
65. **China Patent** CN110444874A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-003/00, H01Q-013/08. Millimeter wave directional diagram reconstructible aerial based on graphene / Wu Bian, Lü Xinlei, Fan Chi, Zhao Yutong, Hu Yue; applicant and patent holder Xidian University. — CN201910680260. 0A; claimed 2019-07-26; published 2019-11-12.
66. **Dixit A. S., Kumar S.** A Survey of Performance Enhancement Techniques of Antipodal Vivaldi Antenna, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 45774–45796.
67. **Dixit A. S., Kumar S.** The enhanced gain and cost-effective antipodal Vivaldi antenna for 5G communication applications, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, vol. 62, no. 6, pp. 2365–2374.
68. **Ashraf M. A., Irfan Memon I., Alshebeili S. A.** Design and analysis of broadband antipodal Vivaldi antenna for radio over fiber systems, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, vol. 59, no. 6, pp. 1441–1446.
69. **Magray M. I., Karthikeya G. S., Muzaffar K., Koul S. K.** Corner Bent Integrated Design of 4G LTE and mm Wave 5G Antennas for Mobile Terminals, *Progress In Electromagnetics Research M*, 2019, vol. 84, pp. 167–175.
70. **Li X., Li Y., Li Z., Kong Q., Wang H., Lv G.** Wideband high-gain SIW-fed antenna array for mm-Wave applications, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, vol. 62, no. 3, pp. 1341–1351.
71. **China Patent** CN110649376A, IPC H01Q-001/22, H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-001/50, H01Q-001/52, H01Q-005/10, H01Q-005/364, H01Q-021/00, H01Q-021/08. Antenna and electronic equipment / Huang Huanqu, Wang Yijin, Zhu Zhimin, Jian Xianjing.; applicant of VIVO MOBILE Communication, patent holder of BBK Communication Technology. — CN201910844037. 5A; declared 2019-09-06; published 2020-01-03.
72. **China Patent** CN209571547U, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-013/10. Isgw ultra-wideband antenna / Shen Dongya, Liu Zhiyu, Yuan Hong; applicant and patent holder Yunnan University. — CN201920474778. 4U; claimed 2019-04-10; published 2019-11-01.
73. **China Patent** CN209571548U, IPC H01Q-001/36, H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-013/10, H01Q-021/06. A kind of microstrip type ISGW circular polarisation gap traveling-wave aerial / SHEN DONGYA, WANG YIAN; applicant and patent holder YUNNAN UNIVERSITY. — CN201920490839.6U; claimed 2019-04-12; published 2019-11-01.
74. **China Patent** CN209592305U, IPC H01Q-001/36, H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-013/10, H01Q-021/06. A kind of ISGW circular polarization gap traveling-wave array antenna / SHEN DONGYA, WANG YIAN; applicant and patent holder Yunnan University. — CN201920491054. 0U; claimed 2019-04-12; published 2019-11-05.
75. **China Patent** CN110676578A, IPC H01Q-001/38, H01Q-001/50, H01Q-009/04. Millimeter wave antenna and electronic device / Yu Chenwu; applicant Guangdong OPPO MOBILE Telecommunications, patent holder BBK ELECTRONICS. — CN201910995132.5A; declared 2019-10-18; published 2020-01-10.
76. **China Patent** CN110212283A, IPC H01Q-001/22, H01Q-001/24, H01Q-001/36, H01Q-001/44, H01Q-001/50, H01Q-005/10, H01Q-005/20, H01Q-005/307. Antenna unit and terminal equipment / Jian Xianjing, Huang Huanqu, Wang Yijin; applicant VIVO MOBILE Communication, patent holder of BBK Communication Technology. — CN201910430964.2A; claimed 2019-05-22; published 2019-09-06.
77. **China Patent** CN110474158A, IPC H01Q-001/22, H01Q-001/24, H01Q-001/36, H01Q-001/50. A kind of antenna element and terminal device / Zhu Zhimin, Huang Huanqu, Wang Yijin; applicant of Vivo Mobile Communication, patent holder of BBK Communication Technology. — CN201910817646. 1A; application 2019-08-30; publ. 2019-11-19.
78. **China Patent** CN110085970A, IPC H01Q-001/22, H01Q-001/36, H01Q-001/38, H01Q-001/48, H01Q-005/10, H01Q-005/371, H01Q-005/378. A kind of antenna and terminal device / Liu Zhikai, Rao Peizong; applicant Shenzhen Jiebao Radio Wave Technology, patent holder Guangzhou Haige Communications. — CN201910291033. 9A; claimed 2019-04-11; published 2019-08-02

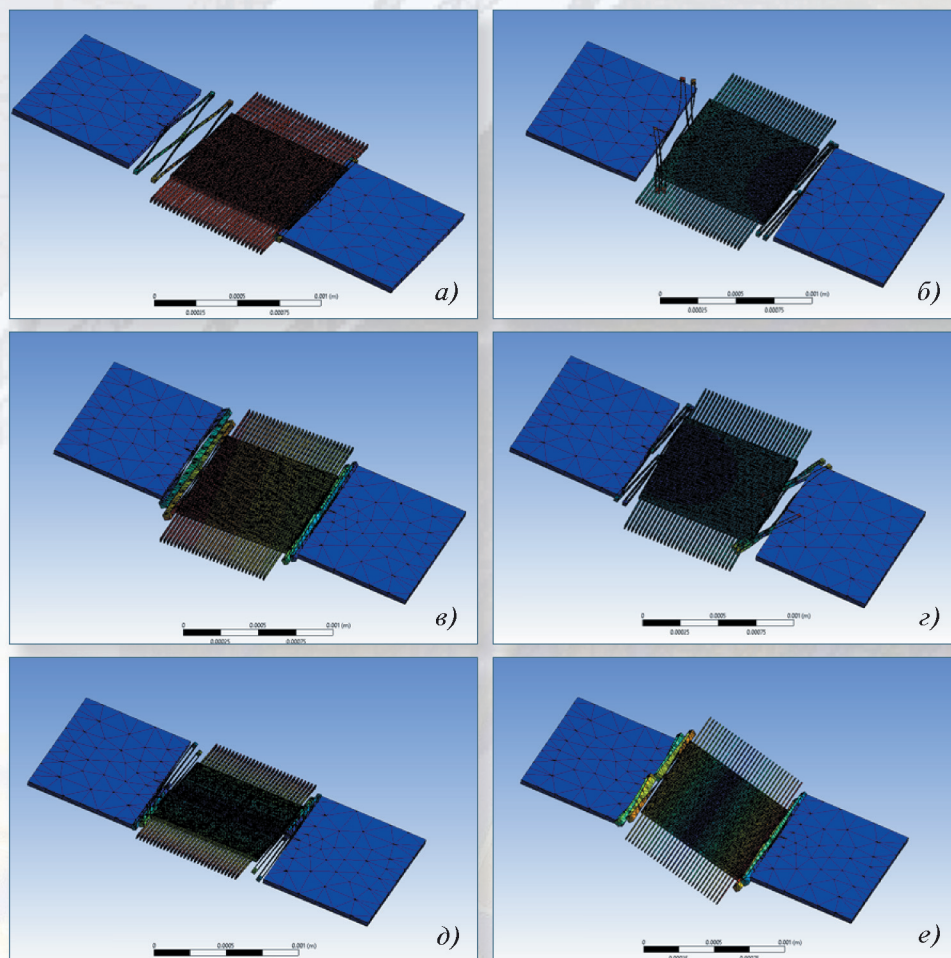
Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru  
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.  
Свидетельство о регистрации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

Технический редактор Т. А. Шацкая. Корректор Н. В. Яшуна.

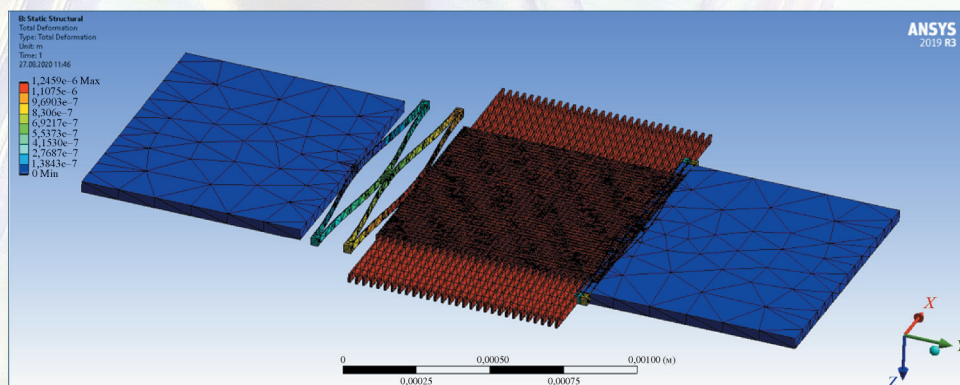
Сдано в набор 19.02.2021. Подписано в печать 24.03.2021. Формат 60×88 1/8. Заказ МС221. Цена договорная  
Оригинал-макет ООО «Авансд солошнз». Отпечатано в ООО «Авансд солошнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)



Рисунки к статье С. П. Тимошенкова, С. А. Анчутина, Н. М. Зарянкина,  
 В. В. Калугина, Е. С. Кочуриной, А. С. Тимошенкова Л.Р. Боева  
**«ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ  
 ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА»**



**Рис. 3. Формы колебаний чувствительного элемента, собственная частота:**  
*a* – 452,83 Гц; *б* – 1825,9 Гц; *в* – 2431,3 Гц; *г* – 2534,6 Гц; *д* – 2686 Гц; *е* – 4863 Гц



**Рис. 4. Максимальное смещение ЧЭ при воздействии вдоль оси чувствительности ускорения значением 1 g**



«ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ФОТОПРОВОДИЯЩИХ ПОЛУПРОВОДИКОВЫХ УСТРОЙСТВ  
ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»

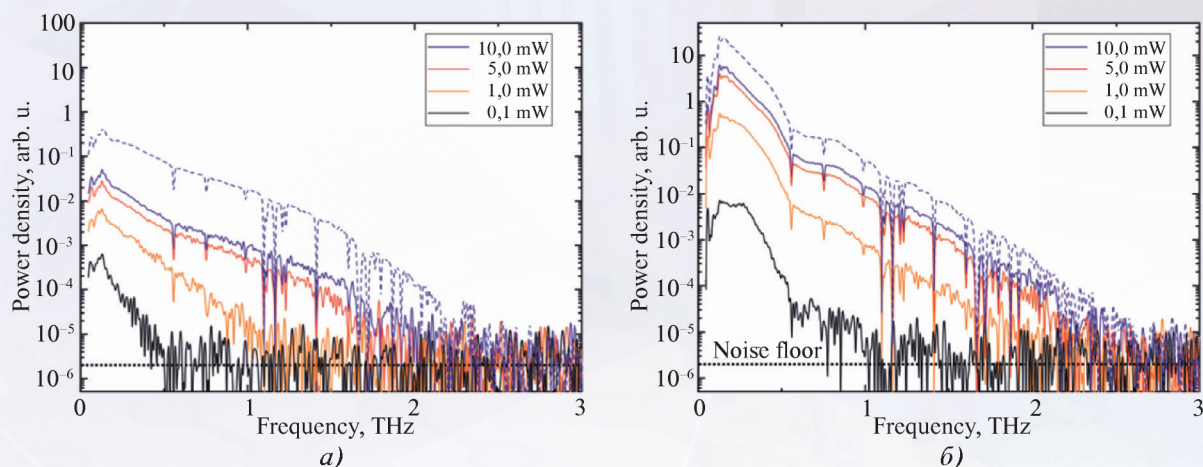


Рис. 3. Спектры излучения при разной средней мощности лазерной накачки ФПА с традиционной топологией (а) и с симметрично расположенными в зазоре 10 мкм плазмнными решетками (б).  
*Noise floor* соответствует уровню шума

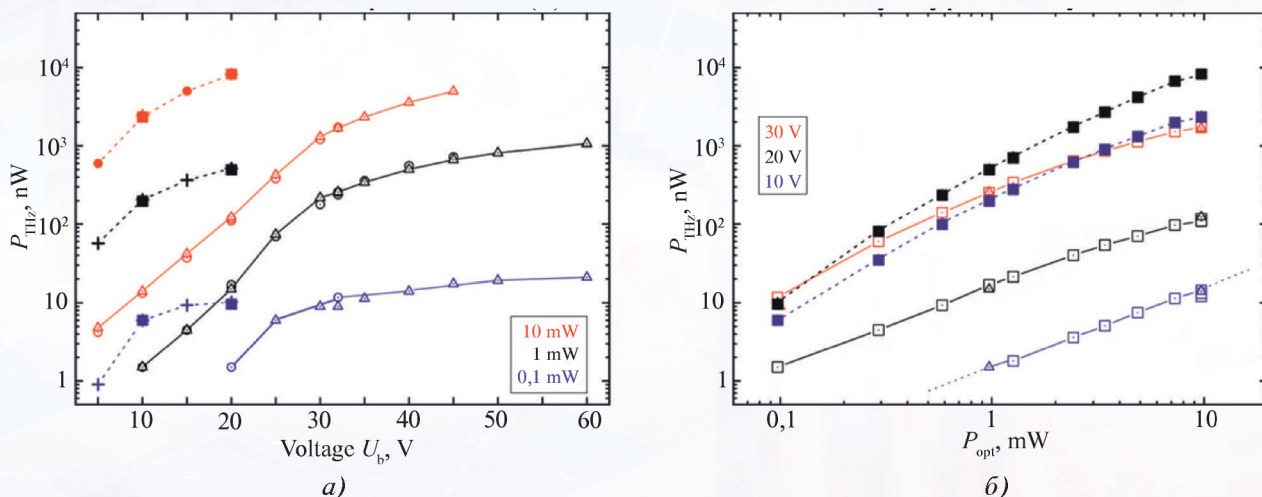


Рис. 4. Интегральная мощность излучения  $P_{THz}$  при разных режимах лазерной накачки образцов ФПА: а – при фиксированном напряжении смещения; б – при постоянной средней мощности лазерной накачки. Сплошные линии соответствуют ФПА с традиционной топологией, штриховые линии – плазмнной ФПА

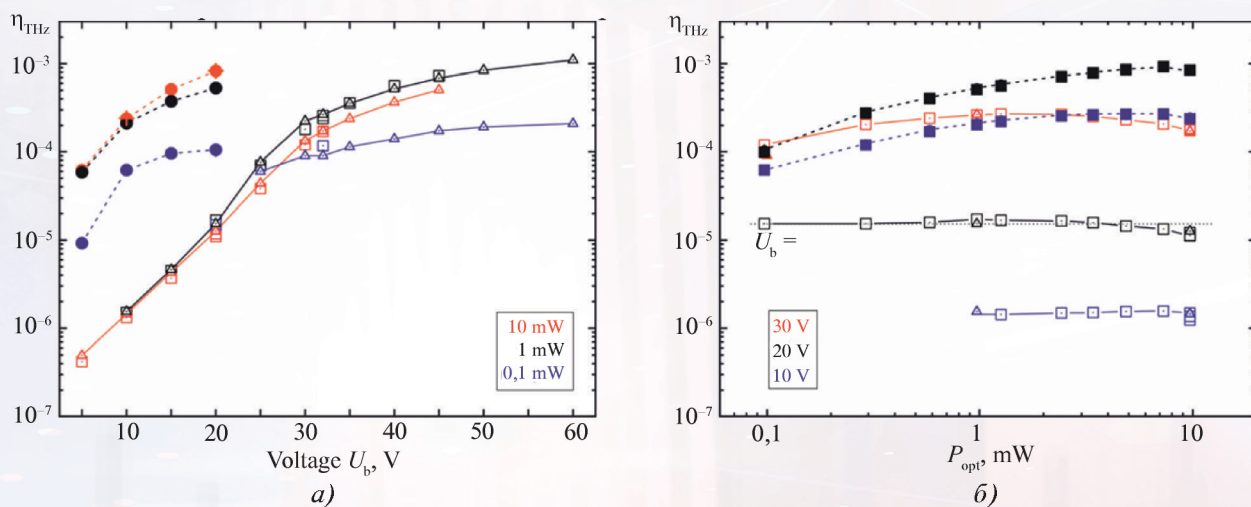


Рис. 5. Эффективности оптико-ТГц конверсии  $\eta$  при разных режимах лазерной накачки образцов ФПА: а – при фиксированном напряжении смещения; б – при постоянной средней мощности лазерной накачки. Сплошные линии соответствуют ФПА с традиционной топологией, штриховые линии – плазмнной ФПА