

ISSN 1813-8586

НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

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

Том 22. № 1. 2020

Рисунок к статье Д. В. Васильева, В. В. Амеличева, Д. В. Костюка,
 Ю. В. Казакова, Е. Е. Низёлко, А. И. Крикунова
«ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ MRAM»

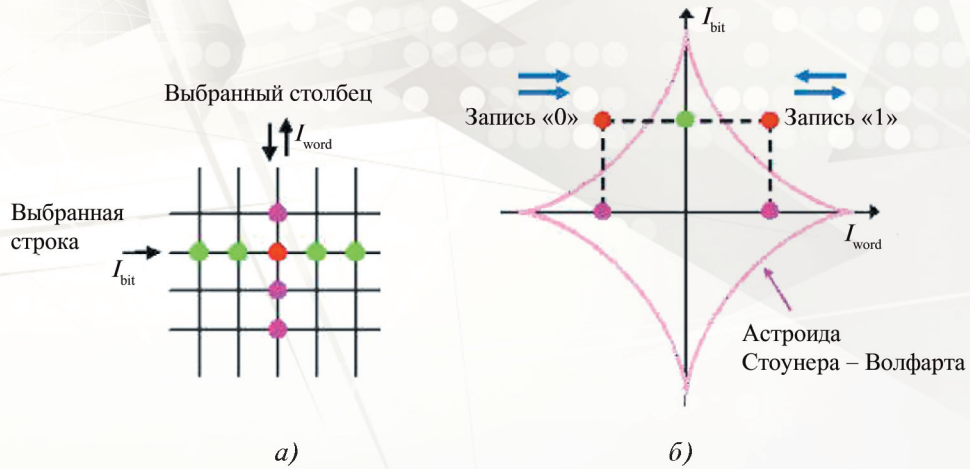


Рис. 4. Схематичное изображение массива СТМ с выбранным для записи элементом (а); астроида Стоунера – Волфарта с обозначением области записи логических состояний (б) [9]

Рисунки к статье П. С. Гуляевой, С. В. Сидоровой
«РЕЗИСТИВНАЯ ПАМЯТЬ: ОСОБЕННОСТИ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВНЕДРЕНИЕМ ЛАБИРИНТНЫХ ПЛЕНОК»

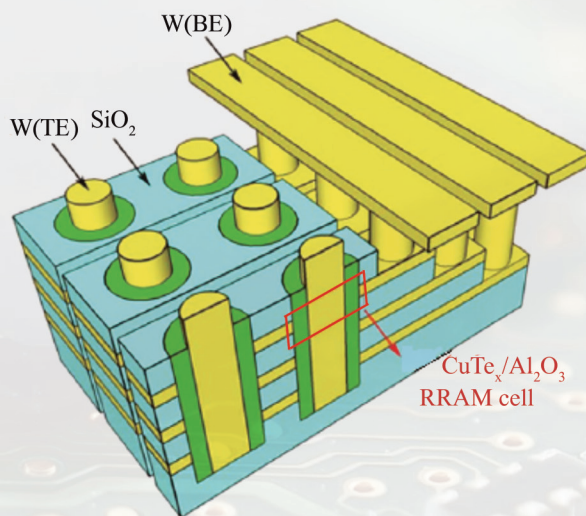


Рис. 5. Многослойный массив вертикальной резистивной памяти на основе токопроводящих наномостиков [11]

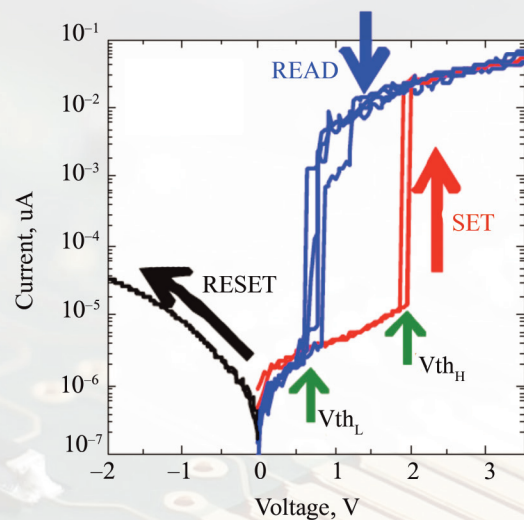


Рис. 6. ВАХ операций над ячейкой вертикальной резистивной памяти на основе наномостиков [7]

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 22. № 7 ✧ 2020

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

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

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

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

Статьи имеют DOI

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

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

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционная коллегия:

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

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

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай)

Басаев А. С., к.ф.-м.н.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Дайнеко А. В., к.х.н.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Кузнецов В. И., д.т.н. (Нидерланды)

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

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

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония)

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

Сингх К., к.т.н. (Индия)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенко С. П., д.т.н.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н., доц.

Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Чугунова А. В. (науч. ред.)

Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Юров В. М., Маханов К. М. Оценка температуры плавления наноструктур твердых тел 347

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Васильев Д. В., Амеличев В. В., Костюк Д. В., Казаков Ю. В., Низёлко Е. Е., Крикунов А. И. Основные конструктивно-технологические особенности MRAM 353

Борисенков И. Л., Крутов А. Ф., Козлов Н. П., Леонович Г. И., Никонов В. И., Захаров В. Н. Математическая модель отраженного оптического сигнала при неоднородной продольной деформации внутриволоконной брэгговской решетки 361

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Любимов А. В., Коровин Г. В., Иванов Е. А. Концепция изготовления двухсторонних коммутационных плат для силовой электроники на основе алюминитридной керамики с переходными металлизированными отверстиями 369

Булярский С. В., Светухин В. В. Растворимость примесей в нанокристаллах кремния 375

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Рубцов Ю. В., Дормидошина Д. А., Савин М. Л. Исследования и результаты сбора, анализа и обобщения информации о выводных рамках, применяемых в изделиях микроэлектроники 381

Гуляева П. С., Сидорова С. В. Резистивная память: особенности, принцип действия и модернизация технологий внедрением лабиринтных пленок 386

Путинцев Б. Г. Обзор приемопередающих МИС диапазона 60 ГГц 393

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

ПОДПИСКА:

по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)

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

Адрес для переписки:

107076 Москва,

Стромынский пер., д. 4

e-mail: nmst@novtex.ru

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 22

No. 7

2020

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY CHIEF EDITOR

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

DEPUTY CHIEF EDITOR

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

Editorial council:

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

Editorial board:

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

Editorial staff:

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

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

CONTENTS

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

Yurov V. M., Makhanov K. M. Assessment of Melting Temperature of Nanostructures Solid Bodies 347

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Vasilyev D. V., Amelichev V. V., Kostyuk D. V., Kazakov Yu. V., Nizyolko E. E., Krikunov A. I. Main Design and Technological Features of MRAM 353

Borysenkov I. L., Krutov A. F., Kozlov N. P., Leonovich G. I., Nikonov V. I., Zakharov V. N. A Mathematical Model of the Reflected Optical Signal with an Inhomogeneous Longitudinal Deformation of an Fiber Bragg Grating 361

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Lyubimov A. V., Korovin G. V., Ivanov E. A. The Concept of Manufacturing Double-Sided Patch Boards for Power Electronics Based on Aluminotride Ceramics with Transitional Metallized Holes 369

Bulyarskiy S. V., Svetukhin V. V. Solubility of Impurities in Silicon Nanocrystals 375

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Rubtsov Yu. V., Dormidoshina D. A., Savin M. L. Research and the Results of the Collection, Analysis and Summarize of Information on the Lead Frame Used in Microelectronics Products 381

Gulyaeva P. S., Sidorova S. V. Resistive Memory: Features, Operating Principle and Modernization of Technology by Labyrinth Films Implantation 386

Putintsev B. G. 60 GHz Transceiver Monolithic Integrated Circuits: an Overview 393

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

В. М. Юров, канд. физ.-мат. наук, доц., директор НИЦ, e-mail: exciton@list.ru,
К. М. Маханов, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры "Физика и нанотехнологии",
Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова, Караганда, Казахстан

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ НАНОСТРУКТУР ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Поступила в редакцию 26.05.2020

Предлагается эмпирическая модель плавления наночастиц любых твердых тел. Температура плавления наночастиц определяется одним параметром, который связан с молярным объемом твердого тела. Размерная зависимость температуры плавления наночастиц вычислена для металлов, диэлектриков, полупроводников, полимеров и металлических стекол. Сравнение с экспериментом проведено для металлов. Полученные данные расчета неплохо согласуются с экспериментом. Если принять комнатную температуру за 300 К, полимеры будут существовать с размерами 50 нм и выше. Это также относится и к диэлектрикам. Наночастицы чистых металлов, полупроводников и металлических стекол стабильны при любых температурах и при размерах порядка 1 нм. Для нанoeлектроники этот вопрос имеет существенное значение.

Ключевые слова: размерный эффект, наноструктура, температура плавления, металл, диэлектрик, полупроводник, полимер, металлическое стекло

Введение

Термодинамическая модель для объяснения зависимости температуры плавления от характерного размера малых частиц была впервые опубликована П. Павловым еще в 1909 г. [1], а экспериментально была обнаружена в 1954 г. М. Такаги [2]. Мы не будем останавливаться на многочисленных теоретических и экспериментальных работах, которые изложены в диссертациях [3–9] и обзорах [10, 11], где приведена обширная библиография по этому вопросу. В настоящей работе обсудим эмпирическую модель плавления наночастиц любых твердых тел и к чему она приводит.

Описание модели

Описание эмпирической модели дано в работах [12, 13], где размерную зависимость физи-

ческого свойства твердого тела $A(r)$ обозначим через температуру $T(r)$:

$$T(r) = T_0(1 - d/r), \quad r \gg d. \quad (1)$$

Параметр $d = 2\delta$, где δ [нм] называется постоянной Толмена [14], которую определить экспериментально невозможно. Параметр d [нм] по нашей модели:

$$d = 2\sigma\nu/RT. \quad (2)$$

Здесь σ — поверхностное натяжение массивного образца, Дж/м²; ν — молярный (атомный) объем, см³/моль; R — газовая постоянная, Дж/кг · К; T — температура, К.

В работах [12], а также [15], было показано, что выполняется соотношение

$$\sigma = 0,78 \cdot 10^{-3} T_m, \quad (3)$$

где T_m — температура плавления твердого тела, К. Соотношение выполняется для всех металлов и для других кристаллических соединений. Если его подставим в выражение (2), то при $T = T_m$ получим

$$d = 0,17 \cdot 10^{-3} \nu. \quad (4)$$

Уравнение (4) показывает, что толщина поверхностного слоя d определяется одним фундаментальным параметром — молярным (атомным) объемом элемента ($\nu = M/\rho$, M — молярная масса (г/моль); ρ — плотность (г/см³)), который периодически изменяется в соответствии с таблицей Д. И. Менделеева.

Уравнение (1) при $r = d$ обращается в ноль, поэтому доопределим его до уравнения

$$T(r) = T_0(1 - d/(d + r)), \quad r < d. \quad (5)$$

При $r = d$ происходит фазовый переход [12], связанный с процессами реконструкции и релаксации поверхности [16], а также смена закона Холла—Петча на обратный [17] и другие явления. Уравнение (1) можно представить в виде:

$$T(r) = T_0 \exp(-d/r). \quad (6)$$

Что дает это уравнение, увидим дальше.

Размерная зависимость температуры плавления чистых металлов

Подставляя (4) в (1), определим температуру плавления некоторых чистых металлов при размерах частиц от $r = 5$ нм до 50 нм (табл. 1).

Сравним значения из табл. 1 с немногочисленными экспериментальными данными. В работе [18] с использованием сверхчувствительного калориметра с чувствительностью 0,1 нДж показано, что температура плавления наночастиц алюминия падает с уменьшением размеров час-

тицы. При этом температура плавления частицы размером 4 нм уменьшается на 140 °С (531 К) по сравнению с температурой плавления образца алюминия обычных размеров. Это неплохо согласуется с табл. 1 $T(r = 4 \text{ нм}) = 584 \text{ К}$. При уменьшении диаметра наночастиц из олова до 8 нм их температура плавления падает на 100 °С (371 К) [19]. Это также неплохо согласуется с данными табл. 1. При этом самое большое падение температуры плавления (более чем на 500 °С = 783 К) было обнаружено у наночастиц золота $T_{\text{Au}}(r = 5 \text{ нм}) = 722 \text{ К}$ [20]. Совпадение с табл. 1 также неплохое, при этом надо учесть ошибку эксперимента. Так, например, в работе М. Такаги [2] сообщалось о снижении температуры плавления для пленок Pb, Sn и Bi толщины около 5 нм на 41, 30 и 23 К соответственно по сравнению с температурой плавления объемных образцов ($T_{\text{Pb}} = 600,61 \text{ К}$; $T_{\text{Sn}} = 504,9 \text{ К}$; $T_{\text{Bi}} = 544,5 \text{ К}$). Это ниже, чем дает для Sn работа [19]. Видимо М. Такаги обнаружил этот эффект на пленках электронографически.

В заключение этого раздела отметим, что можно делать оценку температуры плавления с помощью формул (1), (5) и (6) [по формуле (6) расчеты даны в скобке], поскольку для этого необходимы молярная масса и плотность твердого тела, которые для большинства соединений известны с большой точностью.

Размерная зависимость температуры плавления диэлектриков

Диэлектриков намного больше, чем металлов, поэтому мы выберем вещества с большой молекулярной массой и расчет проведем по формуле (5). Некоторые соединения показаны в табл. 2.

Размерная зависимость физического свойства хлоридов начинается при $h \approx 10 d$ (для NbCl_5

Таблица 1

Размерная зависимость температуры плавления чистых металлов

Металл	d , нм	T_0 , К	$T(r = 5 \text{ нм})$	$T(r = 10 \text{ нм})$	$T(r = 25 \text{ нм})$	$T(r = 50 \text{ нм})$
Al	1,5	934	654 (691)	794	878	906
Sn	1,4	505	364 (384)	434	477	491
Pb	1,8	601	323 (414)	493	558	600
Cu	1,6	1357	923 (991)	1140	1270	1314
Ag	2,2	1235	692 (790)	963	1126	1181
Au	2,3	1337	722 (842)	1029	1214	1276
Zn	1,1	693	541 (554)	617	663	678

это равно 167 нм > 100 нм, больше чем по Глейтеру [21]). Размерные эффекты щелочно-галогидных кристаллов были замечены в 80-х годах прошлого столетия [22].

Размерная зависимость температуры плавления полупроводников

Рассмотрим лишь типичные полупроводники (табл. 3).

Для полупроводников размерная зависимость температуры плавления быстро при $r = 50$ нм достигает температуры массивного образца, зато она сильно зависит от пористости [23]. Существующая номенклатура, принятая Международным союзом теоретической и прикладной химии IUPAC, выделяет три категории размера пор в зависимости от их диаметра: микропористый (< 2 нм), мезопористый (2...50 нм) и макропористый (> 50 нм) [24]. Важной характеристикой p -Si является степень его пористости P , определяемая как

$$P = 1 - \rho_{\text{ПК}}/\rho_{\text{Si}}, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{ПК}}$ — плотность пористого кремния (ПК); ρ_{Si} — плотность монокристалла.

Если подставить уравнение (7) в уравнение (4), то получим

$$d_{\text{ПР}} = d_{\text{Si}}/(1 - P). \quad (8)$$

Типичное значение пористости равно 40...70 %, а при сверхкритическом высушивании [25] достигает 95 %. Из уравнения (8) следует, что при $P = 90$ % толщина $d_{\text{ПК}} = 21$ нм, т. е.

ровно в 10 раз больше, чем у беспористого образца. Тогда для $r = 5$ нм размерная температура по формуле (5) будет равна $T(r = 5 \text{ нм}) = 325$ К, т. е. в 3 раза меньше, чем у беспористого образца. Характерной чертой пористого кремния является большая суммарная площадь его внутренней поверхности. В зависимости от значения пористости и геометрии пор она может составлять для макропористого кремния от 10 до 100 м²/см³, для мезопористого кремния — от 100 до 300 м²/см³ и для нанопористого — от 300 до 800 м²/см³. Пористый кремний в зависимости от условий травления имеет широкий интервал значений удельного сопротивления (10⁻²...10¹¹ Ом·см). Теплопроводность высокопористого кремния более чем на порядок ниже, чем у монокристаллического (~10 Вт/(м·К) при 300 К). Оптические свойства пористого кремния также существенно отличаются от таковых для объемного материала. В частности, край спектра поглощения пористого слоя, отделенного от подложки, в зависимости от пористости смещен в сторону больших $h\nu$ относительно E_{g0} на 100...500 мэВ [26].

Размерная зависимость температуры плавления полимеров

Возьмем типичные полимеры и сделаем расчет по формуле (5).

Если принять комнатную температуру за 300 К, полимеры из табл. 4 будут существовать с размерами 50 нм и выше. Это также относится и к диэлектрикам из табл. 2. Частицы чистых металлов и полупроводников стабильны при лю-

Таблица 2

Размерная зависимость температуры плавления диэлектриков

Диэлектрик	d , нм	T_0 , К	$T(r = 5 \text{ нм})$	$T(r = 10 \text{ нм})$	$T(r = 25 \text{ нм})$	$T(r = 50 \text{ нм})$
NbCl ₅	16,7	478	110	179	279	358
MoCl ₅	15,8	467	112	181	281	360
TaCl ₅	16,3	493	116	185	285	364

Таблица 3

Размерная зависимость температуры плавления полупроводников

Полупроводник	d , нм	T_0 , К	$T(r = 5 \text{ нм})$	$T(r = 10 \text{ нм})$	$T(r = 25 \text{ нм})$	$T(r = 50 \text{ нм})$
Si	2,1	1688	979	1334	1546	1617
Ge	2,3	1211	654	932	1010	1155
GaP	4,1	1750	315	1033	1463	1607

Размерная зависимость температуры плавления полимеров

Полимер	d , нм	T_0 , К	$T(r = 5 \text{ нм})$	$T(r = 10 \text{ нм})$	$T(r = 25 \text{ нм})$	$T(r = 50 \text{ нм})$
$C_{10}H_8$ нафталин	19,1	353	73	121	201	256
$C_{14}H_{10}$ антрацен	27,3	493	77	133	237	320
$C_{18}H_{12}$ тетрацен	28,7	630	93	162	292	399
$C_{22}H_{14}$ пентацен	35,6	544	66	118	223	316
$C_{24}H_{12}$ коронен	37,2	711	85	151	287	409

Таблица 5

Размерная зависимость температуры плавления металлических стекол

Стекло	d , нм	T_0 , К	$T(r = 5 \text{ нм})$	$T(r = 10 \text{ нм})$	$T(r = 25 \text{ нм})$	$T(r = 50 \text{ нм})$
$La_{80}Al_{15}Ge_5$	3,6	545	317	401	476	508
$La_{80}Al_{15}In_5$	3,8	461	272	335	403	428
$La_{80}Al_{15}In_5$	3,6	505	293	371	441	471

бых температурах и при размерах порядка 1 нм. Для нанoeлектроники этот вопрос имеет существенное значение.

Размерная зависимость температуры плавления металлических стекол

В работе [27] были использованы многокомпонентные сплавы, которые полностью аморфизуются при закалке из жидкого состояния со скоростями охлаждения $\sim 5 \cdot 10^4 \dots 10^7$ К/с. Некоторые полученные таким образом металлические стекла рассчитаны по формуле (1) и представлены в табл. 5.

Металлические стекла стабильны при $r = 10$ нм.

Заключение

Если принять комнатную температуру за 300 К, полимеры из табл. 4 будут существовать с размерами 50 нм и выше. Это также относится и к диэлектрикам из табл. 2. Частицы чистых металлов и полупроводников стабильны при любых температурах и при размерах порядка 1 нм. Металлические стекла стабильны при $r = 10$ нм. Для нанoeлектроники этот вопрос имеет существенное значение.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РК. Гранты № 0118РК000063 и № Ф.0781.

Список литературы

1. Pawlow P. Über die Abhängigkeit des Schmelzpunktes von der Oberflächenenergie eines festen Körpers // Zeitschrift für physikalische Chemie. 1909. В. 65. Н. 1. С. 1—35.
2. Tagaki M. Electron-Diffraction Study of Liquid-Solid Transition of Thin Metal Films // J. Phys. Soc. Jap. 1954. Vol. 9. P. 359—363.
3. Коротков П. К. Поверхностная энергия и температура плавления малоразмерных фаз металлических систем. Дис. канд. физ.-мат. наук, Нальчик, 2010. 135 с.
4. Лепешкин С. В. Первопринципное исследование динамики решетки и плавления легких щелочных металлов при высоких давлениях. Дис. канд. физ.-мат. наук, Москва, 2013. 102 с.
5. Васильев О. С. Плавление, огрубление поверхности и электронные свойства нанокластеров металлов различной размерности. Дис. канд. физ.-мат. наук, Москва, 2014. 120 с.
6. Чернышев А. П. Термоактивируемые физические процессы с размерными эффектами в твердом теле. Дис. докт. физ.-мат. наук, Новосибирск, 2014. 304 с.
7. Соколов Д. Н. Изучение термодинамических и структурных характеристик наночастиц металлов в процессах плавления и кристаллизации: теория и компьютерное моделирование. Дис. канд. физ.-мат. наук, Тверь, 2016. 239 с.
8. Гудиева О. В. Поверхностные свойства и ионный перенос в металлических и диэлектрических наноструктурах. Дис. канд. физ.-мат. наук, Нальчик, 2018. 130 с.
9. Талызин И. В. Молекулярно-динамическое исследование термодинамических и кинетических аспектов плавления и кристаллизации металлических наночастиц. Дис. канд. физ.-мат. наук, Тверь, 2019. 148 с.
10. Макаров Г. Н. Экспериментальные методы определения температуры и теплоты плавления кластеров и наночастиц // Успехи физических наук. 2010. Т. 180, № 2. С. 1—24.

11. Самсонов В. М., Сдобняков Н. Ю., Самсонов М. В., Соколов Д. Н., Новожилов Н. В. Термодинамическая модель плавления тонких металлических пленок // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 8. С. 76—80.

12. 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.

13. 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.

14. Tolman R. C. The effect of droplet size on surface tension // Journal of Chemical Physics. 1949. Vol. 17. P. 333—337.

15. Рехвиашвили С. Ш., Кишტიкова Е. В., Кармокова Р. Ю., Кармоков А. М. К расчету постоянной Толмена // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 2. С. 1—7.

16. Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А., Зотов А. В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. 490 с.

17. Юров В. М., Лауринас В. Ч., Гученко С. А. Некоторые вопросы физики прочности металлических наноструктур // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2013. Вып. 5. С. 408—412.

18. Lai S. L., Carlsson J. R. A., Allen L. H. Melting point depression of Al clusters generated during the early stages of film growth: Nanocalorimetry measurements // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 72. P. 1098—1100.

19. Анциферова И. В. Зависимость процесса уплотнения при спекании с использованием наноразмерных металлических порошков (научный обзор) // Вестник ПНИПУ. 2015. Т. 17, № 2. С. 13—20.

20. Buffat Ph., Borel J.-P. Size effect on the melting temperature of gold particles // Phys. Rev. A. 1976. Vol. 13, N. 6. P. 2287—2298.

21. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // Acta mater. 2000. Vol. 48. P. 1—29.

22. Алукер Э. Д., Нестерова С. Н., Нечаев А. Ф. Влияние поверхности на объемную радиoluminesценцию щелочно-галогидных кристаллов // ФТТ. 1988. Т. 30, Вып. 4. С. 1028—1033.

23. Юров В. М. Толщина поверхностного слоя пористого кремния // Вестник КазНУ им. аль Фараби. 2020. № 1 (72). С. 60—66.

24. Korotcenkov G. Porous Silicon: From Formation to Application: Formation and Properties. Vol. 1. CRC Press, 2015. 423 p.

25. Lehmann V., Ronnebeck S. The Physics of Macropore Formation in Low-Doped p-Type Silicon // Journal of The Electrochemical Society. 1999. Vol. 146, N. 8. P. 2968—2975.

26. Трегулов В. В. Пористый кремний: технология, свойства, применение. Рязань: Рязанский гос. ун-т им. С. А. Есенина, 2011. 124 с.

27. Лысенко А. Б., Калинина Т. В., Шулешова К. П., Брусенцов В. Р. Влияние состава на термическую устойчивость аморфных сплавов на основе легких лантаноидов // Днепровский государственный технический университет. г. Каменское. Розділ "Матеріалознавство", 2019. С. 37—41.

V. M. Yurov, Associate Professor, exciton@list.ru,

K. M. Makhanov, Associate Professor,

Karaganda State University named after E. A. Buketov, Karaganda, 100028, Kazakhstan

Corresponding author:

Yurov Viktor M., Associate Professor, Karaganda State University named after E. A. Buketov, Karaganda, 100028, Kazakhstan

E-mail: exciton@list.ru

Assessment of Melting Temperature of Nanostructures Solid Bodies

Received on May 26, 2020

Accepted on June 10, 2020

An empirical model of the melting of nanoparticles of any solids is proposed. The melting temperature of nanoparticles is determined by one parameter, which is associated with the molar volume of a solid. The size dependence of the melting temperature of nanoparticles was calculated for metals, dielectrics, semiconductors, polymers, and metal glasses. Comparison with experiment is carried out for metals. The calculation data obtained are in good agreement with the experiment. If we take room temperature as 300 K, polymers will exist with sizes of 50 nm and above. This also applies to dielectrics. Nanoparticles of pure metals, semiconductors, and metal glasses are stable at all temperatures and with sizes on the order of 1 nm. For nanoelectronics, this issue is significant.

Keywords: size effect, nanostructure, melting point, metal, dielectric, semiconductor, polymer, metal glass

Acknowledgements: This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan. Grants No. 0118PK000063 and No. Ф.0781.

For citation:

Yurov V. M., Makhhanov K. M. Assessment of Melting Temperature of Nanostructures Solid Bodies, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 7, pp. 347–352.

DOI: 10.17587/nmst.22.347-352

References

1. **Pawlow P.** Über die Abhängigkeit des Schmelzpunktes von der Oberflächenenergie eines festen Körpers, *Zeitschrift für physikalische Chemie*, 1909, B. 65, H. 1, pp. 1–35.
2. **Tagaki M.** Electron-Diffraction Study of Liquid-Solid Transition of Thin Metal Films, *J. Phys. Soc. Jap.*, 1954, vol. 9, pp. 359–363.
3. **Korotkov P. K.** Surface energy and melting temperature of small-sized phases of metal systems. — Diss. Candidate Phys.-Math. Sciences. Nalchik. 2010. 135 p. (in Russian).
4. **Lepeshkin S. V.** First-principle study of lattice dynamics and melting of light alkali metals at high pressures. — Diss. Candidate Phys.-Math. Sciences. Moscow, 2013. 102 p. (in Russian).
5. **Vasiliev O. S.** Surface melting, roughening, and electronic properties of metal nanoclusters of various dimensions. — Diss. Candidate Phys.-Math. Sciences, Moscow, 2014. 120 p. (in Russian).
6. **Chernyshev A. P.** Thermally activated physical processes with dimensional effects in a solid. — Diss. Doctors Phys.-Math. Sciences, Novosibirsk, 2014. 304 p. (in Russian).
7. **Sokolov D. N.** The study of thermodynamic and structural characteristics of metal nanoparticles in the processes of melting and crystallization: theory and computer simulation. — Diss. Candidate Phys.-Math. Sciences. Tver, 2016, 239 p. (in Russian).
8. **Gudieva O. V.** Surface properties and ion transport in metal and dielectric nanostructures. — Diss. Candidate Phys.-Math. Sciences. Nalchik. 2018. 130 p. (in Russian).
9. **Talyzin I. V.** Molecular-dynamic study of the thermodynamic and kinetic aspects of the melting and crystallization of metal nanoparticles. — Diss. Candidate Phys.-Math. Sciences. Tver, 2019, 148 p. (in Russian).
10. **Makarov G. N.** Experimental methods for determining the temperature and heat of fusion of clusters and nanoparticles, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2010, vol. 180, no. 2, pp. 1–24 (in Russian).
11. **Samsonov V. M., Sdobnyakov N. Yu., Samsonov M. V., Sokolov D. N., Novozhilov N. V.** Thermodynamic model of melting of thin metal films, *Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*, 2015. No. 8. P. 76–80 (in Russian).
12. **Yurov V. M., Guchenko S. A., Laurinas V. Ch.** Thickness of the surface layer, surface energy and atomic volume of an element, *Physicochemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*, 2018. Is. 10, pp. 691–699 (in Russian).
13. **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).
14. **Tolman R. C.** The effect of droplet size on surface tension, *Journal of Chemical Physics*, 1949, vol. 17, pp. 333–337.
15. **Rekhviashvili S. Sh., Kishtikova E. V., Karmokova R. Yu., Karmokov A. M.** To the calculation of the Tolman constant, *Letters in ZhTF*, 2007, vol. 33, no. 2, pp. 1–7 (in Russian).
16. **Oura K., Lifshits V. G., Saranin A. A., Zotov A. V., Katayama M.** Introduction to surface physics. Moscow, Science, 2006, 490 p. (in Russian).
17. **Yurov V. M., Laurinas V. Ch., Guchenko S. A.** Some questions of the physics of strength of metal nanostructures, *Physico-chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*, 2013, is. 5, pp. 408–412 (in Russian).
18. **Lai S. L., Carlsson J. R. A., Allen L. H.** Melting point depression of Al clusters generated during the early stages of film growth: Nanocalorimetry measurements, *Appl. Phys. Lett.*, 1998, vol. 72, pp. 1098–1100.
19. **Antsiferova I. V.** Dependence of the compaction process during sintering using nanosized metal powders (scientific review), *Bulletin of PNIPU*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 13–20. (in Russian).
20. **Buffat Ph., Borel J.-P.** Size effect on the melting temperature of gold particles, *Phys. Rev. A.*, 1976, vol. 13, no. 6, pp. 2287–2298.
21. **Gleiter H.** Nanostructured materials: basic concepts and microstructure, *Acta mater*, 2000, vol. 48, pp. 1–29.
22. **Aluker E. D., Nesterova S. N., Nechaev A. F.** The effect of the surface on the volume radioluminescence of alkali halide crystals, *FTT*, 1988, vol. 30, is. 4, pp. 1028–1033 (in Russian).
23. **Yurov V. M.** The thickness of the surface layer of porous silicon, *Bulletin of KazNU. Al Farabi*, 2020, no. 1 (72), pp. 60–66 (in Kazakh).
24. **Korotcenkov G.** Porous Silicon: From Formation to Application: Formation and Properties. Vol. 1. CRC Press. 2015. 423 p.
25. **Lehmann V., Ronnebeck S.** The Physics of Macropore Formation in Low-Doped p-Type Silicon, *Journal of The Electrochemical Society*, 1999, vol. 146, no. 8, pp. 2968–2975.
26. **Tregulov V. V.** Porous silicon: technology, properties, application. — Ryazan, Ryazan state. un-t them. S. A. Yese-nin, 2011. 124 p. (in Russian).
27. **Lysenko A. B., Kalinina T. V., Shuleshova K. P., Brusentsov V. R.** The effect of composition on the thermal stability of amorphous alloys based on light lanthanides, Dneprov State Technical University. Kamenskoye. Rozdil "Material knowledge", 2019, pp. 37–41 (in Ukrainian).

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ MNST MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 53.087.92, 004.332.3, 53.082.7

DOI: 10.17587/nmst.22.353-361

Д. В. Васильев, науч. сотр., e-mail: 29diman05@mail.ru,
В. В. Амеличев, канд. техн. наук, нач. отд., e-mail: avv@tcen.ru,
Д. В. Костюк, нач. лаб., e-mail: D.Kostyuk@tcen.ru,
Ю. В. Казаков, науч. сотр., e-mail: madvcat@gmail.com,
Е. Е. Низёлко, техник 1 кат., e-mail: nizelko.k@yandex.ru,
А. И. Крикунов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: kral@mail.ru,
Научно-производственный комплекс "Технологический центр", 124498, г. Москва, Зеленоград

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ MRAM

Поступила в редакцию 03.06.2020

Магниторезистивная память с произвольным доступом имеет ряд преимуществ, которые позволяют укреплять ее позиции на рынке устройств памяти. Основными достоинствами MRAM являются энергонезависимость, практически неограниченное число циклов перезаписи, стойкость к воздействию внешних факторов, включая специальные. Проведен анализ конструктивно-технологических особенностей различных видов MRAM. Представлена динамика развития серийно выпускаемых микросхем MRAM компаний Everspin Technologies и Samsung.

Ключевые слова: энергонезависимая память, MRAM, спин-туннельный переход, спин-туннельный магниторезистивный эффект, SW-MRAM, Toggle MRAM, STT-MRAM, TA-MRAM

Введение

На современном этапе развития электронных приборов и устройств все большую актуальность приобретают такие их характеристики, как энергонезависимость, быстродействие, время выхода на режим (быстрый старт), надежность и устойчивость к сбоям при внешних воздействующих факторах. Для обеспечения таких характеристик необходимы соответствующие компоненты, среди которых важное место занимают микросхемы памяти. Одним из перспективных видов памяти в настоящее время является MRAM (*magnetoresistive random-access memory* — магниторезистивная память с произвольным доступом).

Для записи и хранения информации MRAM использует свойства наноструктуры, состоящей

из определенной комбинации тонких пленок из магнитных и немагнитных материалов. Она характеризуется энергонезависимостью и практически неограниченным числом циклов перезаписи. Быстродействие MRAM сравнимо с SRAM (*static random access memory* — статическая память с произвольным доступом), так, например, время цикла записи/чтения для STT-MRAM (*spin-transfer torque* — перенос спина) составляет 30 нс [1]. Ввиду того что MRAM не обладает свойством утечки заряда, данные могут сохраняться более 20 лет [2]. Микросхемы MRAM функционируют в широком температурном диапазоне от -40 до $+125$ °С, обладают стойкостью к воздействию радиации и прочего ионизирующего излучения [2]. Перечисленные достоинства MRAM ориентированы на применение, в первую очередь, в аэро-

космическом и автомобильном секторах, в устройствах и системах специального назначения, там, где последствия потери данных вследствие внешних воздействующих факторов могут быть катастрофическими.

Основы конструирования MRAM

В основе первой коммерческой микросхемы MRAM лежит массив ячеек памяти, каждая из которых содержит транзистор и спин-туннельный переход (СТП). MRAM использует магнитный момент для хранения информации, ориентация намагниченности свободного слоя СТП относительно намагниченности фиксированного слоя определяет логическое состояние ячейки. На рис. 1 представлена структура СТП, где ферромагнитные пленки разделены диэлектрическим слоем — туннельным барьером. Относительная ориентация намагниченностей ферромагнитных слоев определяет сопротивление СТП: оно минимально, когда направления намагниченности двух слоев параллельны, и максимально, когда намагниченности пленок антипараллельны.

В качестве ферромагнитных слоев можно применять сплавы FeNi, CoFe, FeNiCo, CoFeV; барьерным слоем служат оксиды магния, алюминия, гафния; в качестве антиферромагнитного слоя могут быть использованы сплавы PtMn, FeMn, IrMn. Наноструктуры типа CoFeV/MgO/CoFeV обладают спин-туннельным магниторезистивным (СТМР) эффектом до 604 % при комнатной температуре [4]. При температуре 5 К СТМР эффект составляет 1100 %, что соответствует теоретическим прогнозам [4].

Ячейка MRAM, как правило, имеет в своем составе один транзистор и один СТП. Данная конструкция ячейки известна как архитектура 1Т-1МТJ (*magnetic tunnel junction* — магнитный туннельный переход), которая получила наиболь-

шее распространение в микросхемах памяти. Первые микросхемы MRAM показали, что сочетают в себе ключевые характеристики, которые ранее считались несовместимыми, такие как энергонезависимость, низкое энергопотребление, практически неограниченное число циклов чтения / записи и высокая скорость работы.

Классификация и конструктивно-технологические особенности современных MRAM

Микросхемы MRAM можно классифицировать по методу переключения, используемому для записи данных. MRAM первого поколения используют магнитные поля для записи данных. Первые прототипы микросхем изготавливали с учетом модели перемагничивания Стоунера—Волфарта (SW-MRAM) [5], запись данных осуществляли ортогональные шины. Основным представителем MRAM первого поколения являются микросхемы toggle MRAM с переключением Савченко, которые с 2006 г. выпускает серийно компания Everspin Technologies.

Основным преимуществом переключения полем является неограниченная долговечность записи, поскольку изменение намагниченности свободного слоя магнитным полем не создает эффектов износа. Недостатком является сложность масштабирования до меньших размеров ячеек ввиду нескольких факторов, включая значения требуемых токов переключения и сложную геометрию ячеек памяти.

MRAM второго поколения использует перенос спина (STT — *spin-transfer torque*) для записи логического состояния. Переключение STT-MRAM может быть реализовано с ячейками СТП, имеющими намагниченность в плоскости или перпендикулярно плоскости структуры.

Другим подходом к переключению логического состояния ячейки MRAM является тепловое переключение — TAS (*thermal-assisted switching*), при котором запись данных происходит за счет перемагничивания при наносекундном локальном нагреве.

Таким образом, микросхемы MRAM в зависимости от конструкции и вида переключения отличаются друг от друга энергопотреблением, числом циклов перезаписи, надежностью и максимально допустимым объемом памяти [6].

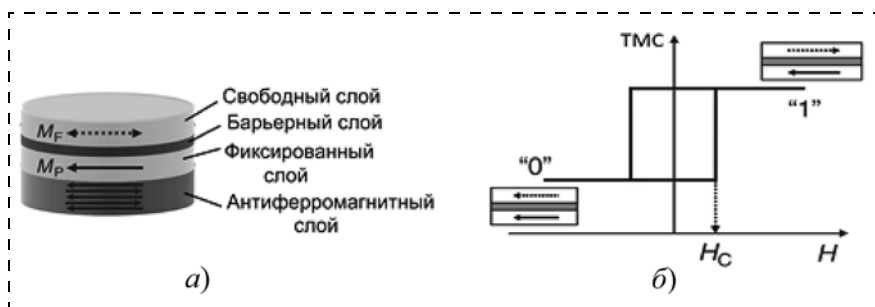


Рис. 1. Структура СТП ячейки MRAM (а) и схематичное изображение петли перемагничивания СТП (б) [3]

Конструктивные особенности ячеек SW-MRAM и toggle MRAM

В основе первых конструкций микросхем MRAM лежали спин-туннельные переходы с фиксированным слоем. Изменение логического состояния ячейки осуществлялось путем перемагничивания свободного слоя. Известны два типа MRAM с записью данных магнитным полем, получившие практическую реализацию.

SW-MRAM (*Stoner-Wohlfarth MRAM*) характеризуется перемагничиванием свободного слоя на основе модели Стоунера—Волфарта [5]. Рассматриваемый конструктивный вариант магниторезистивной памяти состоит из спин-туннельных переходов эллиптической формы с осью легкой намагниченности (ОЛН), направленной вдоль длинной оси эллипса.

В работе [7] конструкция ячейки MRAM состоит из двух транзисторов, к которым подключена шина записи, и одного СТП. Перемагничивание ячейки обеспечивается магнитным полем, создаваемым шиной записи; в рассматриваемом конструктивном исполнении нижний электрод СТП также выполняет функции шины записи (рис. 2). Направление ОЛН отклонено на 45° относительно шины записи для перемагничивания свободного слоя в соответствии с астроидами Стоунера—Волфарта.

Рассматриваемая ячейка памяти данной конструкции имеет высокую скорость записи (порядка 1 нс [7]), высокую селективность, исключает влияние шин записи на соседние ячейки. Выбор нужного элемента для записи или чтения осуществляют управляющие транзисторы.

Другой конструктивный вариант SW-MRAM основан на записи логического состояния ячейки двумя ортогональными шинами (рис. 3): одна

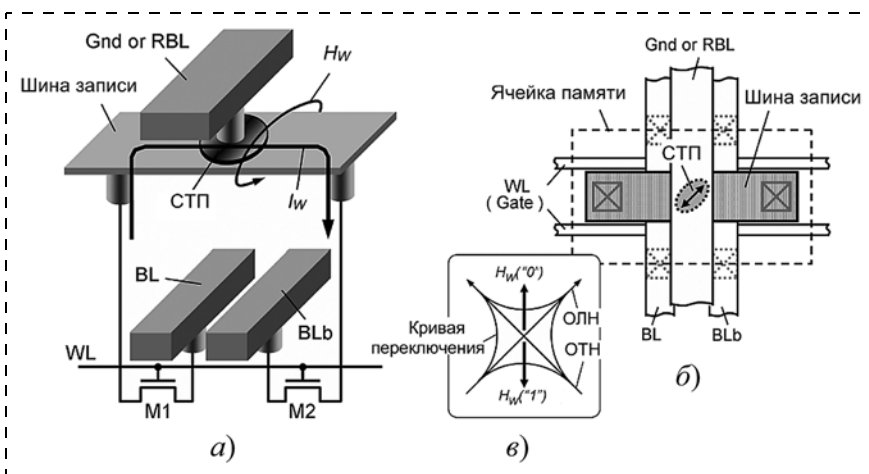


Рис. 2. Конструкция (а) и топология (б) ячейки памяти, область записи (в) [7]

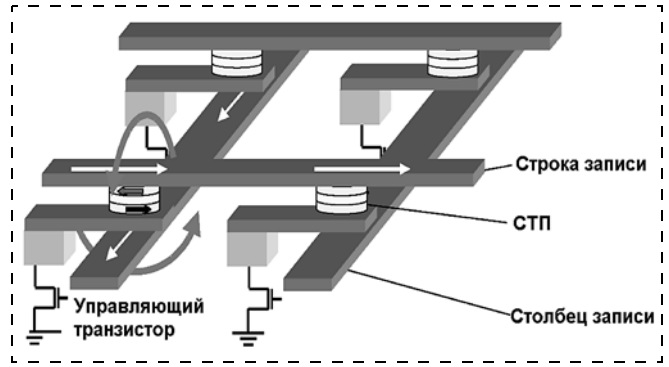


Рис. 3. Эскиз ячейки SW-MRAM [8]

из шин создает магнитное поле вдоль ОЛН, другая — вдоль ОТН [8]. Принцип перемагничивания свободного слоя основан на астроиде Стоунера—Волфарта, показанной на рис. 4 (см. вторую сторону обложки). Выбранный элемент находится на пересечении строки и столбца, совокупность импульсов тока которых перемагничивает свободный слой СТП. На рис. 4 зеленые и фиолетовые точки иллюстрируют соседние ячейки, которые могут изменить свое состояние вследствие воздействия магнитного поля от строки или столбца [9].

Конструкция SW-MRAM имеет ряд недостатков: модель перемагничивания Стоунера—Волфарта справедлива лишь при температуре 0 К; температурные воздействия значительно изменяют область записи. Отклонение линейных размеров СТП в составе одного массива влияет на их перемагничивание, затрудняя поиск общей рабочей области записи. Для избежания влияния на соседние элементы необходимо, чтобы магнитное поле шины было меньше поля магнитной анизотропии, в противном случае все соседние СТП, расположенные на соответствующей шине, будут перемагничиваться [8].

Конструкция toggle MRAM позволяет избежать указанных недостатков. Принцип работы toggle MRAM основан на режиме переключения свободного слоя СТП определенной последовательностью импульсов тока в ортогональных шинах, который получил название "переключение Савченко" [10]. Совокупность импульсов перемагничивает выбранную ячейку, соседние элементы на выбранных строке и столбце остаются неиз-

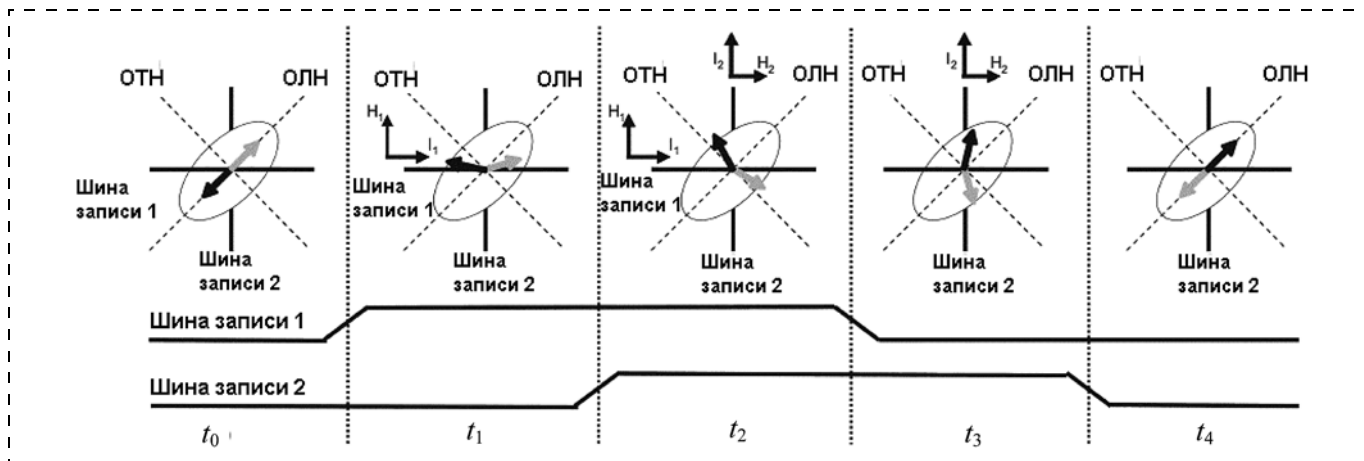


Рис. 5. Последовательность импульсов тока для записи в toggle MRAM [10]

менными. СТП ячейки имеет форму эллипса, большая ось которого совпадает с направлением ОЛН и отклонена на 45° относительно ортогональных шин. Режим переключения Савченко основан на особенности перемагничивания свободного слоя, содержащего синтетический антиферромагнетик (САФ). САФ представляет собой два ферромагнитных слоя, разделенных немагнитным слоем, при отсутствии магнитного поля ферромагнетики находятся в антипараллельном состоянии за счет РККИ-взаимодействия (обменное взаимодействие Рудермана — Киттеля — Касуя — Иосиды). При воздействии магнитного поля определенного значения (спин-флоп-магнитное поле) система из двух ферромагнитных слоев переходит в спин-флоп-состояние: разворачивается ортогонально направлению воздействия магнитного поля и изменяет антипараллельное состояние на конфигурацию "ножницы" (рис. 5). Переключение Савченко изменяет на-

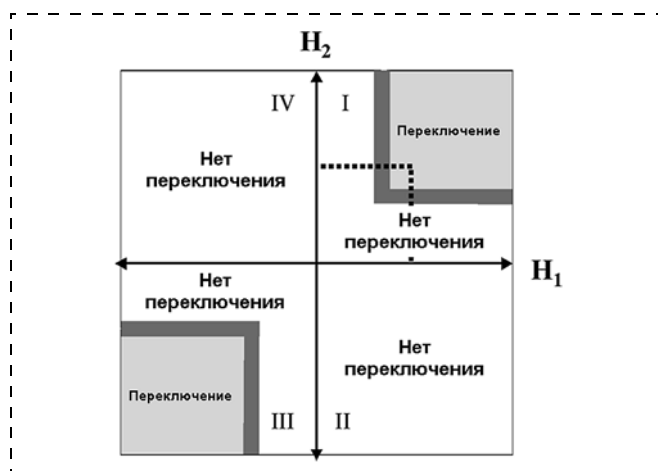


Рис. 6. Схематичное изображение областей перемагничивания toggle MRAM [10]

правление намагниченности ферромагнитного слоя, граничащего с барьерным слоем и определяющего логическое состояние ячейки, на 180° за счет создания вращающего магнитного поля.

Расположение областей переключения ячейки приведено на рис. 6, Toggle MRAM имеет более высокую селективность по сравнению с SW-MRAM. Темно-серый контур соответствует полям, при которых происходит перемагничивание свободного слоя, но с учетом возможного разброса параметров в массиве СТП, чтобы обеспечить надежное переключение ячейки, необходимо задавать магнитные поля, соответствующие серой области; в белых областях элементы не перемагничиваются [10].

Компания Everspin Technologies в 2006 г. начала выпуск микросхем MRAM на основе переключения Савченко. Время цикла чтения-записи составляет 35 нс, микросхема работает в широком температурном диапазоне от -40 до $+125^\circ\text{C}$ и является радиационно-стойкой [8].

С ростом плотности элементов уменьшается топологический размер СТП и соответственно ширина шин записи, что приводит к увеличению плотности тока в них. Из чего следует, что порог электромиграции в медных шинах ограничивает топологический размер СТП значением в 100 нм [8].

Конструктивные особенности ячеек STT-MRAM

В ячейках MRAM запись может осуществляться не только магнитными полями, но также с применением так называемого эффекта переноса спина. При пропускании электрического тока через магнитную пленку крутящий момент будет действовать на доменную стенку, застав-

ляя ее двигаться вдоль направления электрического тока. И наоборот, когда направление тока меняется на противоположное, крутящий момент также будет изменяться, заставляя доменную стенку двигаться в противоположном направлении. Спин-поляризованный ток, генерируемый таким образом, будет создавать момент намагничивания мягкого слоя, который в основном состоянии ориентирован под углом относительно угла наклона спинового фильтра.

Применение STT-MRAM позволило значительно снизить ток переключения по сравнению с MRAM с переключением магнитным полем. Когда ячейка становится меньше, ток записи уменьшается пропорционально площади СТП до минимального значения, зависящего от коэффициента термостабильности ячейки и других параметров, характерных для материала, используемого для накопительного слоя [3].

STT-MRAM имеет более простую геометрию (рис. 7), что позволяет уменьшить размер ячейки. Для дальнейшей минимизации размера ячейки для STT-MRAM применяют структуры с перпендикулярной магнитной анизотропией (pSTT-MRAM). Плотность тока для переключения П-СТП (СТП со слоями, намагниченность которых перпендикулярна их плоскости) значительно ниже, чем для STT-MRAM с намагниченностью в плоскости. Перпендикулярная намагниченность исключает необходимость формирования СТП в форме эллипса, элементы изготавливают в форме круга, увеличивая плотность упаковки ячеек в микросхеме. Взаимодействие между соседними ячейками pSTT-MRAM в микросхемах высокой плотности упаковки снижено за счет перпендикулярной намагниченности [8].

Основной задачей для STT-MRAM является одновременное достижение низкого тока переключения, высокой термостойкости и большого значения СТМП эффекта. Для считывания информации необходим некоторый минимальный СТМП эффект, чтобы иметь достаточный сигнал для определения логического состояния схемой считывания. Необходимый фактический минимум СТМП эффекта зависит от устройства схемы считывания и распределения битовых сопротивлений, но общие требования для минимального значения в массивах MRAM составляют от 150 до 300 %, а иногда и больше. Для записи STT-MRAM желательно иметь ток переключения, который меньше, чем ток насыщения транзистора минимального размера в указанном тех-

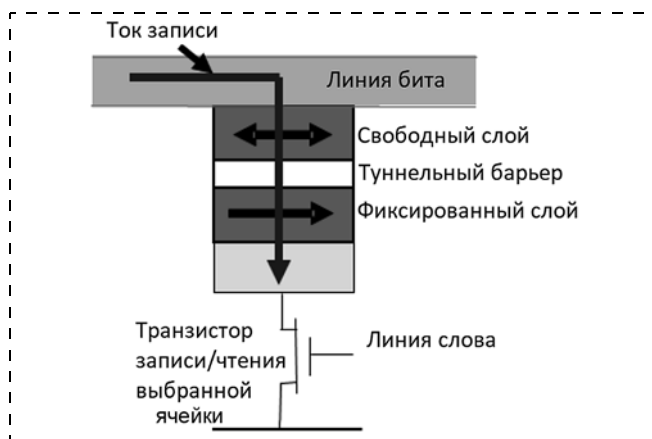


Рис. 7. Структура ячейки STT-MRAM [11]

нологическом узле. Для хранения информации типичным требованием является наличие коэффициента термостабильности $\Delta > 80$ для массива памяти 1 Гбит. Ток переключения при температуре напрямую связан с коэффициентом термостабильности Δ , который прямо пропорционально зависит от энергетического барьера E_b между параллельным и антипараллельным состояниями, обратно пропорционален абсолютной температуре T и постоянной Больцмана k_B . Значение E_b свободного ферромагнитного слоя уменьшается с увеличением температуры вследствие уменьшения намагниченности насыщения M_s и поля анизотропии H_k . Чтобы сохранить термостабильность при высоких температурах, необходимо увеличить E_b , что приведет к высоким токам переключения при низких температурах. Таким образом, достижение высокой эффективности требует минимизации температурной зависимости магнитных свойств свободного слоя [12].

Вопрос о технических устройствах, отвечающих всем трем вышеупомянутым требованиям, иногда называют трилеммой STT-MRAM, поскольку зачастую можно улучшить одно или два свойства, но за счет третьего. Например, для STT-MRAM в плоскости увеличение толщины свободного слоя обеспечивает простой способ повысить значение СТМП эффекта и термическую стабильность, но при этом увеличивается ток переключения [5]. Для решения трилеммы используют комбинацию методов переключения ячеек STT-MRAM.

Конструктивные особенности ячеек TA-MRAM

TAS является одним из новых перспективных способов переключения состояния ячеек MRAM.

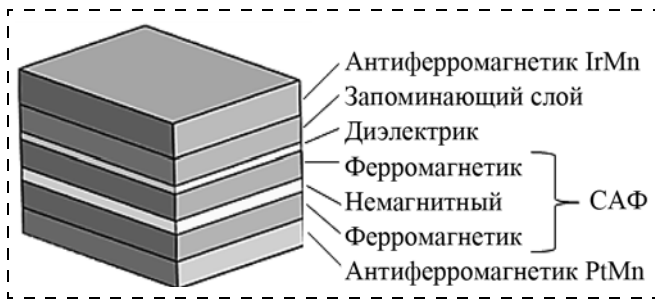


Рис. 8. Структура СТП TA-MRAM

СТП TA-MRAM состоит из фиксированного слоя с антиферромагнетиком PtMn, имеющим высокую температуру блокировки (рис. 8). В состав фиксированного слоя входит САФ структура, логическое состояние ячейки определяет опорный слой — ферромагнитный слой САФ структуры, граничащий с туннельным барьером. После туннельного барьера, представленного тонкой диэлектрической пленкой, расположен запоминающий слой, фиксацию которого обеспечивает антиферромагнитный слой IrMn с более низкой температурой блокировки [8, 13].

Данная структура СТП связана с механизмом записи информации в TA-MRAM, для которой требуются две шины. По первой шине проходит двунаправленный ток для создания нелокального магнитного поля. Шина проходит через несколько переходов сразу (по строке). Вторая шина для каждого СТП создает локальный ток для нагревания элемента [14].

Чтобы изменить ориентацию запоминающего слоя, используется двухэтапный процесс. Во-первых, подается большой импульс тока записи для нагрева определенного СТП, равный приблизительно 20 мА для размера ячейки 2×2 мкм [8] длительностью 3...10 нс [8, 13]. При достижении температуры выше температуры блокировки антиферромагнетика IrMn фиксированный им запоминающий слой становится свободным и может переключаться внешним магнитным полем от первой шины. Данная температура лежит в пределах от 110 до 150 °С в зависимости от технологии изготовления [13]. Как только импульс достигает нужной мощности, СТП начинает охлаждаться в те-

чение 10...20 нс, формируется ориентация у запоминающего слоя и восстанавливается связь со слабым антиферромагнитным слоем. Процесс считывания длительностью 50 нс происходит с помощью управляющего транзистора, подключенного к СТП. Таким образом, СТП может находиться в состоянии с высоким или низким сопротивлением в зависимости от относительной ориентации запоминающего и фиксированного слоев. Благодаря тому что фиксированный слой связан с антиферромагнитным слоем PtMn, обладающим более высокой температурой блокировки, температурное воздействие не разрушает фиксацию слоя [15].

Для увеличения объема памяти в микросхемах MRAM совмещают STT и TAS подходы к переключению логических состояний [8]. В TA-MRAM это позволит заменить две шины для записи одной, по которой будет течь поляризованный ток, данная шина будет и нагревать, и перемагничивать ячейку. Используя данный подход в TA-STT-MRAM, можно уменьшить габаритные размеры ячеек и число операций для записи (рис. 9) [8].

TA-MRAM благодаря своим преимуществам (отсутствие случайного перемагничивания соседних ячеек, низкое потребление, термическая стабильность) становится одним из перспективных направлений в развитии MRAM. Тем не менее относительно небольшая плотность упаковки ячеек остается проблемой, которая может быть решена совмещением технологий TA-MRAM и STT-MRAM.



Рис. 9. Принцип записи TA-MRAM импульсом магнитного поля и TA-STT-MRAM поляризованным током [8]

Основные этапы развития микросхем MRAM

Интеграция технологических процессов изготовления микросхем MRAM с КМОП-технологией прошла успешно, и в 2003 г. на симпозиуме *IBM* и *Infineon* была продемонстрирована микросхема магнитной памяти емкостью 128 Кбит. Микросхема изготовлена по 0,18-мкм технологии, площадь ячейки памяти составила 1,4 мкм². Значения времени чтения и записи одинаковы — 5 нс, ток записи равен 6 мА [16].

В 2004 г. представлен опытный образец микросхемы toggle MRAM емкостью 4 Мбит, изготовленный по 0,18 мкм-технологии, с площадью ячейки 1,55 мкм², в июле 2006 г. компания *FreeScale* вывела такие микросхемы на рынок [10].

Компания *Sony* в декабре 2005 г. анонсировала демонстрацию опытного образца микросхемы STT-MRAM емкостью 128 Кбит с ячейкой типа 1T1-MTJ, СТП которой имела форму эллипса размерами 100 × 150 нм. Время записи составило менее 2 нс, ток при этом менее 200 мкА.

В начале 2007 г. компания *Hitachi* объявила о создании совместно с учеными Университета Тохоку опытного образца микросхемы STT-памяти емкостью 2 Мбит, временем записи 100 нс и временем считывания 40 нс.

В 2008 г. корпорация *Freescale* создала компанию *Everspin Technologies* для исследований и производства микросхем MRAM [2]. Компания выпускает микросхемы toggle MRAM с параллельным и последовательным интерфейсами емкостью от 128 Кбит до 16 Мбит. Параллельные MRAM (8- или 16-разрядные) имеют время чтения/записи на уровне 35/45 нс. Последовательные MRAM оснащены SPI-интерфейсом, работают на частоте 40 МГц [2].

Компания *Everspin Technologies* в 2012 г. выпустила микросхемы STT-MRAM емкостью 64 Мбит. В 2016 г. компания *Everspin* продемонстрировала опытные образцы микросхемы STT-MRAM емкостью 256 Мбит на основе СТП с перпендикулярной магнитной анизотропией (ПМА), с конца 2017 г. эти микросхемы выпускают серийно. В 2017 г. представлены опытные образцы микросхемы STT-MRAM емкостью 1 Гбит, которые изготовлены по 28-нм процессу на 300-мм пластинах, в июне 2019 г. стартовал массовый выпуск данных микросхем.

В марте 2019 г. компанией *Samsung* начаты поставки встраиваемой STT-MRAM емкостью 256 и 512 Мбит, в декабре *Samsung* демонстрирует прототип встраиваемой STT-MRAM емкостью 1 Гбит, изготовленный по 28-нм техно-

логическому процессу. Площадь ячейки составила 0,0364 мкм² с диаметром СТП 38...45 нм.

Заключение

Таким образом, в результате оптимизации конструктивных и технологических решений начат серийный выпуск микросхем MRAM. Достоинства MRAM позволят не только осваивать новые области применения микросхем хранения данных, но и вытеснить другие виды памяти с рынка запоминающих устройств.

Кроме того, продолжают исследования нового подхода записи с применением эффекта переноса спина, что позволит значительно повысить скорость записи и чтения данных в MRAM. Разработки новых материалов, входящих в состав СТП, обеспечили увеличение СТМР эффекта и тем самым надежное и быстрое чтение логических состояний. Так, применение структур с ПМА в СТП способствовали разработке микросхем с более плотной упаковкой и, следовательно, большим объемом хранения данных.

В итоге, MRAM имеет потенциал для захвата значительной части рынка полупроводниковой памяти. Крупные производители полупроводниковой промышленности в настоящее время занимаются исследованиями и разработками прототипов микросхем MRAM с последующим продвижением их на рынок, ведут исследования в целях снижения времени записи и энергопотребления, разрабатывают новые подходы к записи логического состояния.

Список литературы

1. **Intel** показала STT-MRAM для кеш-памяти L4 [Электронный ресурс] / 3D News, 2019. URL: <https://3dnews.ru/999493> (дата обращения: 28.04.2020).
2. **Бабурин С., Самоделов А.** Магниторезистивная память MRAM компании EverspinTechnologies // Компоненты и технологии. 2012. № 10. С. 51—54.
3. **Novel Magnetic Nanostructures** / Editors: N. Domracheva, M. Caporali, E. Rentschler, 2018. P. 267—331.
4. **Ikeda S., Hayakawa J., Ashizawa Y., Lee Y. M., Miura K., Hasegawa H., Tsunoda M., Matsukura F., Ohno H.** Tunnel magnetoresistance of 604 % at 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93, N. 8. P. 082508.
5. **Stoner E. C., Wohlfarth E. P.** A mechanism of magnetic hysteresis in heterogenous alloys // Phil. Trans. Roy. Soc. — A240. 1948. P. 599—642.
6. **Шурыгина В.** Энергонезависимая память. Кто победит в гонке? Часть 2 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. № 6. С. 36—47.
7. **Sakimura N., Sugibayashi T., Honda T., Honjo H., Saito Sh., Suzuki T., Ishiwata N., Tahara Sh.** MRAM cell

technology for over 500-MHz SoC // Journal of Solid-State Circuits. 2007. Vol. 42, N. 4. P. 830–838.

8. **Dieny B., Goldfarb R. B., Lee K.-J.** Introduction to magnetic random-access memory // *Magnetics*. 2017. P. 255.

9. **Gaidis M. C.** Nanotechnology. Magnetoresistive Random Access Memory. 2010. P. 456.

10. **Engel B. N., Akerman J., Butcher B., Dave R. W., DeHerrera M., Durlam M., Grynkewich G., Janesky J., Pietambaram S. V., Rizzo N. D., Slaughter J. M., Smith K., Sun J. J., Tehrani S.** A 4-Mb Toggle MRAM based on a novel bit and switching method // *Transactions on magnetic*. 2005. Vol. 41, N. 1. P. 132–136.

11. **Kent A., Worledge D.** A new spin on magnetic memories // *Nature Nanotech*. 2015. Vol. 10. P. 187–191.

12. **Iwata-Harms J. M., Jan G., Liu H., Serrano-Guisan S., Zhu J., Thomas L., Tong R.-Y., Sundar V., Wang P.-K.** High-temperature thermal stability driven by magnetization

dilution in CoFeB free layers for spin-transfer-torque magnetic random access memory // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. P. 14409.

13. **Silva V., Fernandes J. R., Oliveira L. B., Neto H. C., Ferreira R., Freitas S., Freitas P. P.** Thermal assisted switching magnetic tunnel junctions as FPGA memory elements // *International Journal of Microelectronics and Computer Science*. 2010. Vol. 1, N. 1. P. 31–36.

14. **Prejbeanu I. L., Kerekes M., Sousa R. C., et al.** Thermally-assisted MRAM // *Journal of Physics Condensed Matter*. 2007. Vol. 20.

15. **Prejbeanu I., Kula W., Ounadjela K., Sousa R., Redon O., Dieny B.** Thermally-assisted switching in exchange-biased storage layer magnetic tunnel junctions // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2004. Vol. 40. P. 2625–2627.

16. **Валентинова М.** Полупроводниковая энергонезависимая память // *Электроника: НТБ*. 2003. № 5. С. 10–15.

D. V. Vasilyev, Researcher, e-mail: 29diman05@mail.ru,
V. V. Amelichev, Ph. D., Head of Department, e-mail: avv@tcen.ru,
D. V. Kostyuk, Head of Laboratory, e-mail: D.Kostyuk@tcen.ru,
Yu. V. Kazakov, Researcher, e-mail: madvcat@gmail.com,
E. E. Nizyolko, First Category Technician, e-mail: nizelko.k@yandex.ru,
A. I. Krikunov, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: kral@mail.ru,
Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre", Moscow, Zelenograd, 124498,
Russian Federation

Corresponding author:

Vasilyev Dmitry V., Researcher, Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre", Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation
E-mail: 29diman05@mail.ru

Main Design and Technological Features of MRAM

Received on June 03, 2020

Accepted on June 15, 2020

Magnetoresistive random access memory has a number of advantages that allow strengthening its position over other memory devices. The main advantages of MRAM are non-volatility, almost unlimited number of rewriting cycles, and resistance to external factors such as temperature, radiation. The MRAM cell consists of a spin-tunnel junction and a transistor. The spin-tunnel junction is a multi-layer nanostructure consisting of a specific combination of thin films of magnetic and non-magnetic materials. First-generation microchips with field induced magnetic switching had a low packing density. Second-generation MRAM uses spin — transfer torque to switch the logical state. Another type of switching is thermal-assisted switching with local heating and bus magnetization. The analysis of design and technological features of various types of MRAM is carried out. The spin-tunnel junctions with perpendicular magnetic anisotropy provided the development of chips with denser packaging and a large amount of data storage. The dynamics of development of mass-produced MRAM chips from Everspin Technologies and Samsung is presented. The first commercially available toggle MRAM chips had the capacity of 4 Mb and size of the cell 1,55 μm . In June 2019, Everspin Technologies began mass production of STT-MRAM chips with a capacity of 1 Gbit, which are manufactured using a 28 nm CMOS process on 300 mm substrates.

Keywords: non-volatile memory, MRAM, spin-tunnel junction, spin-tunnel magnetoresistive effect, SW-MRAM, toggle MRAM, STT-MRAM, TA-MRAM, perpendicular magnetic anisotropy, magnetization, synthetic antiferromagnets

For citation:

Vasilyev D. V., Amelichev V. V., Kostyuk D. V., Kazakov Yu. V., Nizyolko E. E., Krikunov A. I. Main Design and Technological Features of MRAM, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 7, pp. 353–361.

DOI: 10.17587/nmst.22.353-361

References

1. Intel pokazala STT-MRAM dlya kesh-pamjati L4 [Electronic Resource] / 3D News, 2019. Access mode: <https://3dnews.ru/999493> (call date: 28.04.2020).
2. Baburin S., Samodelov A. Magnitorezistivnaja pamjat' MRAM kompanii Everspin Technologies, *Komponenty i tehnologii*. 2012, no. 10, pp. 51–54 (in Russian).
3. Novel Magnetic Nanostructures / Editors: N. Domracheva, M. Caporali, E. Rentschler, 2018, pp. 267–331.
4. Ikeda S., Hayakawa J., Ashizawa Y., Lee Y. M., Miura K., Hasegawa H., Tsunoda M., Matsukura F., Ohno H. Tunnel magnetoresistance of 604 % at 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature, *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 93, no. 8, pp. 082508.
5. Stoner E. C., Wohlfarth E. P. A mechanism of magnetic hysteresis in heterogenous alloys, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A240, 1948, pp. 599–642.
6. Shurygina V. Jenergonezavisimaja pamjat'. Kto pobedit v gonke? Chast' 2, *Jelektronika: nauka, tehnologija, biznes*, 2008, no. 6, pp. 36–47 (in Russian).
7. Sakimura N., Sugibayashi T., Honda T., Honjo H., Saito Sh., Suzuki T., Ishiwata N., Tahara Sh. MRAM cell technology for over 500-MHz SoC, *Journal of solid-state circuits*, 2007, vol. 42, no. 4, pp. 830–838.
8. Dieny B., Goldfarb R. B., Lee K.-J. Introduction to magnetic random-access memory. *Magnetics*, 2017, p. 255.
9. Gaidis M. C. Nanotechnology. Magnetoresistive Random Access Memory, 2010, p. 456.
10. Engel B. N., Akerman J., Butcher B., Dave R. W., DeHerrera M., Durlam M., Grynkewich G., Janesky J., Pietambaram S. V., Rizzo N. D., Slaughter J. M., Smith K., Sun J. J., Tehrani S. A 4-Mb Toggle MRAM based on a novel bit and switching method, *Transactions on magnetic*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 132–136.
11. Kent A., Worledge D. A new spin on magnetic memories, *Nature Nanotech*, 2015, vol. 10, pp. 187–191.
12. Iwata-Harms J. M., Jan G., Liu H., Serrano-Guisan S., Zhu J., Thomas L., Tong R.-Y., Sundar V., Wang P.-K. High-temperature thermal stability driven by magnetization dilution in CoFeB free layers for spin-transfer-torque magnetic random access memory, *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, pp. 14409.
13. Silva V., Fernandes J. R., Oliveira L. B., Neto H. C., Ferreira R., Freitas S., Freitas P. P. Thermal assisted switching magnetic tunnel junctions as FPGA memory elements, *International Journal of Microelectronics and Computer Science*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 31–36.
14. Prejbeanu I. L., Kerekes M., Sousa R. C., et al. Thermally-assisted MRAM, *Journal of Physics Condensed Matter*, 2007, vol. 20.
15. Prejbeanu I., Kula W., Ounadjela K., Sousa R., Redon O., Dieny B. Thermally-assisted switching in exchange-biased storage layer magnetic tunnel junctions, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, vol. 40, pp. 2625–2627.
16. Valentinova M. Poluprovodnikovaja jenergonezavisimaja pamjat', *Jelektronika: NTB*, no. 5, pp. 10–15.

УДК 54.02

DOI: 10.17587/nmst.22.361-368

И. Л. Борисенков¹, канд. техн. наук, зам. председателя Секции, borisenkov46@yandex.ru,
А. Ф. Крутов², д-р физ.-мат. наук, проф., krutov@ssau.ru,
Н. П. Козлов², канд. физ.-мат. наук, доц., knp-box@yandex.ru,
Г. И. Леонович¹, д-р техн. наук, нач. отделения, leogil@mail.ru,
В. И. Никонов², канд. физ.-мат. наук, доц., nikon5919@mail.ru,
В. Н. Захаров², аспирант, ZaharoffV@inbox.ru,

¹ Секция прикладных проблем при Президиуме Российской академии наук, Москва,

² Самарский национальный исследовательский университет, Самара

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТРАЖЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ НЕОДНОРОДНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВНУТРИВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ

Поступила в редакцию 17.06.2020

Показана актуальность и предложена новая последовательная математическая модель оптического сигнала для нелинейно деформируемых квазипериодических одномерных внутриволоконных брэгговских решеток. Определена зависимость относительной спектральной плотности интенсивности отраженного светового потока от параметров неоднородности продольной деформации. Модель основана на фундаментальных уравнениях электродинамики и оптики и построена в рамках общепринятых приближений.

Ключевые слова: оптоволоконные датчики и устройства, внутриволоконная брэгговская решетка, нелинейная деформация, спектральная плотность

Введение

К одним из наиболее эффективных преобразователей, отвечающих высоким требованиям по метрологическим, энергетическим и эксплуатационным показателям, относятся волоконно-оптические датчики (ВОД) на внутриволоконных брэгговских решетках (ВБР). Среди них особое место занимают появившиеся сравнительно недавно гибридные датчики, в которых короткопериодическая ВБР сопрягается с сенсорно-актюаторной структурой (САС), преобразующей измеряемую физическую или химическую величину в деформирующее воздействие. Функции САС выполняют постоянно расширяющийся спектр пленочных покрытий на сенсорный участок оптоволоконна с решеткой, а также дискретные элементы (магниты, электреты, акустические мембраны, пружины, кантилеверы и др.), которые жестко закрепляют с одной или обеих сторон участка [1–3]. При описании построения моделей гибридных и аналогичных им датчиков и устройств деформирующее воздействие практически во всех публикациях рассматривается равномерным и однородным по всему сенсорному участку, что в ряде случаев приводит к существенному расхождению (до 30–40 %) результатов моделирования и практических экспериментов. Поэтому развитие математического аппарата, необходимого для построения прецизионных адекватных моделей гибридных датчиков и родственных им исполнительных устройств, становится крайне важным для обеспечения требуемых метрологических характеристик.

Прохождение световой волны через короткопериодическую ВБР, как правило, описывают в рамках теории прохождения и преобразования света в средах с одномерной периодичностью (см., например, [4]). Для описания взаимодействия света с такими средами используют различные методы, в частности метод Флоке—Блоха [5], методы теории возмущений [6, 7], а также теорию связанных волн Х. Когельника [8, 9] и некоторые ее модификации [10]. Однако при сильной нелинейной деформации оптоволоконна под действием внешних воздействий в ВОД на ВБР для расчета прохождения света через ВБР требуется обобщение существующих теорий на случай сильного нарушения периодичности среды.

Строгое решение задачи о деформации оптоволоконна под действием поверхностных сил в аксиально-симметричном случае, описывающее

неоднородную деформацию, получено в работе [11]. Выведенные в [11] аналитические выражения для продольной и поперечной компонент вектора деформации внутренних точек оптоволоконна являются важными для базовых практических расчетов оптических свойств ВОД на ВБР. Неоднородная деформация оптоволоконна приводит, в частности, к неэквидистантности и искривлению первоначально плоских штрихов элементов неоднородности ВБР. Полученную структуру, состоящую из подобных, но не идентичных элементов, повторяющихся приблизительно периодически, будем называть квазипериодической. Влияние неоднородности распределения деформаций по длине и поперечному сечению оптоволоконна на отражательные свойства ВБР заслуживает отдельного детального анализа. В представленной работе будут обсуждаться только эффекты, связанные с неоднородностью продольной деформации оптоволоконна без учета отклонения профиля структурных неоднородностей, формирующих решетку Брэгга в оптоволоконне, от плоской или близкой к ней идеальной формы.

Таким образом, целью исследования является формулировка последовательной математической модели прохождения света через короткопериодическую ВБР при неоднородной продольной деформации оптоволоконна, а также расчет на ее основе спектральной плотности отраженного оптического сигнала и количественная оценка оптических эффектов, возникающих в оптоволоконне.

Для решения поставленной задачи осуществлена модификация теории связанных волн [8, 9] на случай одномерных квазипериодических сред с описанием спектральной плотности интенсивности отраженной от брэгговской решетки световой волны в рамках развитого подхода. Включение в математическую модель условия квазипериодичности, по сути, впервые при моделировании ВБР отображает не идеальную, а реально выполненную структуру с учетом конструктивного исполнения датчиков и устройств, особенностей воздействия функциональной величины и эксплуатационных факторов. Учет искривления плоской формы структурных неоднородностей ВБР в рамках теории связанных волн и, соответственно, описание прохождения света через такую решетку Брэгга будут выполнены в последующих работах.

Предложенная математическая модель основана на фундаментальных уравнениях электро-

динамики и оптики и построена в рамках общепринятых приближений. В частности, используются: приближение медленно меняющихся амплитуд; приближение заданного поля, при котором амплитуда падающей волны считается постоянной; приближение малой отстройки длины падающей волны от длины волны Брэгга, а также приближение слабого затухания света в оптоволокне. Все перечисленные приближения не зависят от конструктивных особенностей конкретных устройств на ВБР, а вносимая ими погрешность составляет доли процента, например, от погрешности расчета величин механических деформаций САС, возникающих в оптоволокне (см. [11] и ссылки, приведенные там).

Численный расчет оптических эффектов проводят в случае, когда ВБР задана гармонически изменяющимся показателем преломления на некотором участке оптоволокна и при сильном продольном искажении исходной решетки Брэгга от внешнего воздействия. Заметим, что сформулированная модель позволяет проводить расчеты и при любой другой функциональной зависимости показателя преломления оптоволокна, формирующего брэгговскую решетку.

Амплитуда светового сигнала, отраженного от квазипериодической внутриволоконной брэгговской решетки

Рассмотрим бесконечно длинное оптоволокно постоянного конечного сечения. Направим ось z вдоль оси оптоволокна. Будем считать, что изменение показателя преломления $\varepsilon(z)$ сердцевины оптоволокна, формирующее параметры ВБР, зависит только от координаты z .

В этом случае амплитуда напряженности электрического поля в световой волне, распространяющейся вдоль оптоволокна, удовлетворяет уравнению (см., например, [4]):

$$\frac{d^2 E(z)}{dz^2} + k_0^2 \varepsilon(z) E(z) = 0, \quad (1)$$

$E(z)$ — комплексная амплитуда колебаний вектора напряженности электрического поля внутри оптоволокна; k_0 — волновой вектор; $\varepsilon(z)$ — диэлектрическая проницаемость, периодически изменяющаяся вдоль оси z участка оптоволокна с ВБР.

Перейдем в уравнении (1) от диэлектрической проницаемости к показателю преломления $\varepsilon(z) = n^2(z)$. Будем считать, что затухание мало, т. е. показатель преломления является вещественной функцией переменной z .

Пусть зависимость показателя преломления на отрезке $\left[-\frac{L}{2}, \frac{L}{2}\right]$ имеет следующий вид:

$$n(z) = n_0 + \Delta n_M(z), \quad |\Delta n_M(z)| \ll n_0, \\ \Delta n_M\left(-\infty, -\frac{L}{2}\right) = \Delta n_M\left(\frac{L}{2}, \infty\right) = 0, \quad (2)$$

где n_0 — показатель преломления материала сердцевины оптоволокна до нанесения решетки Брэгга; $\Delta n_M(z)$ — периодическая функция модуляции показателя преломления сердцевины оптоволокна, формирующая ВБР; L — длина решетки Брэгга.

В соответствии с неравенством в (2) пренебрегаем членами второго порядка малости $\frac{\Delta n_M(z)}{n_0}$, в результате получаем для диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon(z) = n^2(z) \approx n_0^2 + n_0^2 n_M(z), \quad (3)$$

где $n_M(z) = \frac{2}{n_0} \Delta n_M(z)$.

Подставим (3) в (1) и получим уравнение

$$\frac{d^2 E(z)}{dz^2} + k^2 E(z) + k^2 n_M(z) E(z) = 0, \quad (4)$$

где $k = n_0 k_0$.

Для решения уравнения (4) воспользуемся представлением Х. Когельника для напряженности электрического поля в виде суммы падающей и отраженной волн [8, 9]:

$$E(z) = A^{(+)}(z) e^{ikz} + A^{(-)}(z) e^{-ikz}, \quad (5)$$

где $A^{(\pm)}(z)$ — медленно меняющиеся амплитуды падающей и отраженной волн соответственно.

Подставим (5) в (4) и воспользуемся приближением медленно меняющихся амплитуд, т. е. пренебрежем вторыми производными от $A^{(\pm)}(z)$:

$$2ik \frac{dA^{(+)}}{dz} e^{ikz} - 2ik \frac{dA^{(-)}}{dz} e^{-ikz} + \\ + k^2 n_M(z) A^{(+)}(z) e^{ikz} + k^2 n_M(z) A^{(-)}(z) e^{-ikz} = 0. \quad (6)$$

Выполним разложение амплитуд по пространственным частотам:

$$A^{(\pm)}(z) = \frac{1}{2\pi} \int A^{(\pm)}(\xi) e^{i\xi z} d\xi, \quad (7)$$

где $A^{(\pm)}(\xi)$ — амплитуда соответствующей пространственной гармоники; ξ — пространственная частота.

После подстановки (7) в (6) получаем:

$$\begin{aligned} & 2ike^{ikz} \frac{1}{2\pi} \int (-i\xi') A^{(+)}(\xi') e^{i\xi' z} d\xi' - \\ & - 2ike^{-ikz} \frac{1}{2\pi} \int (-i\xi'') A^{(-)}(\xi'') e^{i\xi'' z} d\xi'' + \\ & + k^2 n_M(z) e^{ikz} \frac{1}{2\pi} \int A^{(+)}(\xi') e^{i\xi' z} d\xi' + \\ & + k^2 n_M(z) e^{-ikz} \frac{1}{2\pi} \int A^{(-)}(\xi'') e^{i\xi'' z} d\xi'' = 0, \quad (8) \end{aligned}$$

где переменные интегрирования для падающей и отраженной волн обозначены для удобства через ξ' и ξ'' соответственно.

Для выражения амплитуды отраженной волны из уравнения (8) умножим обе части (8) на e^{-ikz} и проинтегрируем по всем значениям переменной z :

$$\begin{aligned} & 2ik \int (-i\xi') A^{(+)}(\xi') \delta(\xi') d\xi' - \\ & - 2ik \int (-i\xi'') A^{(-)}(\xi'') \delta(\xi'' - 2k) d\xi'' + \\ & + k^2 \int A^{(+)}(\xi') \left[\frac{1}{2\pi} \int n_M(z) e^{i\xi' z} dz \right] d\xi' + \\ & + k^2 \int A^{(-)}(\xi'') \left[\frac{1}{2\pi} \int n_M(z) e^{i(\xi'' - 2k)z} dz \right] d\xi'' = 0. \quad (9) \end{aligned}$$

При получении (9) мы воспользовались известным интегральным представлением для δ -функции Дирака:

$$\delta(x) = \delta(-x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ixz} dz. \quad (10)$$

Введем обозначение:

$$n_M(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int n_M(z) e^{i\xi z} dz. \quad (11)$$

Снимая интегрирование в (9) с помощью δ -функций, получаем:

$$\begin{aligned} A^{(-)}(2k) &= \frac{1}{4} \int A^{(+)}(\xi') n_M(\xi') d\xi' + \\ &+ \frac{1}{4} \int A^{(-)}(\xi'') n_M(\xi'' - 2k) d\xi''. \quad (12) \end{aligned}$$

Оценим отношение модулей интегралов в правой части равенства (12):

$$\begin{aligned} & \frac{\left| \int A^{(-)}(\xi) n_M(\xi - 2k) d\xi \right|}{\left| \int A^{(+)}(\xi) n_M(\xi) d\xi \right|} = \\ &= \lim_{\xi_0 \rightarrow \infty} \frac{\left| \int_{-\xi_0}^{\xi_0} A^{(-)}(\xi) n_M(\xi - 2k) d\xi \right|}{\left| \int_{-\xi_0}^{\xi_0} A^{(+)}(\xi) n_M(\xi) d\xi \right|} = \\ &= \lim_{\xi_0 \rightarrow \infty} \frac{|A^{(-)}(\tilde{\xi}) n_M(\tilde{\xi} - 2k)| 2\xi_0}{|A^{(+)}(\tilde{\xi}) n_M(\tilde{\xi})| 2\xi_0} = \\ &= \frac{|A^{(-)}(\tilde{\xi})| |n_M(\tilde{\xi} - 2k)|}{|A^{(+)}(\tilde{\xi})| |n_M(\tilde{\xi})|} \ll 1, \end{aligned}$$

где $\tilde{\xi}$ и $\tilde{\xi}$ — значения аргументов на отрезке $[-\xi_0, \xi_0]$ при вычислении интегралов по теореме о среднем; ξ_0 — параметр обрезания по пространственным частотам, необходимый для теоремы о среднем.

В последней оценке использован тот факт, что модуль амплитуды отраженной волны много меньше модуля амплитуды падающей волны. В качестве иллюстрации к этому утверждению напомним, что коэффициент отражения от каждой неоднородности, образующей ВБР, равен с точностью до множителя порядка единицы квадрату разности показателя преломления на неоднородности [12], а глубина модуляции показателя преломления сердцевинны оптоволокна при формировании типовой короткопериодической решетки Брэгга (2), как правило, имеет значение порядка $\Delta n_M \approx 10^{-5}$.

Таким образом, справедлива оценка:

$$|\int A^{(-)}(\xi'') n_M(\xi'' - 2k) d\xi''| \ll |\int A^{(+)}(\xi') n_M(\xi') d\xi'|. \quad (13)$$

В результате с учетом (13) равенство (12) принимает вид:

$$A^{(-)}(2k) = \frac{1}{4} \int A^{(+)}(\xi') n_M(\xi') d\xi'. \quad (14)$$

Воспользуемся теперь приближением малости отстройки от брэгговской длины волны невозмущенного оптоволокна. Это означает, что спектр амплитуды падающей волны лежит в узкой окрестности длины волны Брэгга. Принимая во внимание, что пространственная частота

в 2 раза больше частоты падающей световой волны (например, брэгговская длина волны в 2 раза больше периода решетки $\lambda_B = 2\Lambda_B$) получаем

$$A^{(-)}(2k) = \frac{1}{4} \int_{2k-\Delta k}^{2k+\Delta k} A^{(+)}(\xi) n_M(\xi) d\xi', \quad (15)$$

где $2\Delta k$ — спектральный интервал падающей световой волны.

В силу малости спектрального интервала имеем

$$A^{(-)}(2k) = \frac{1}{2} A^{(+)}(2k) n_M(2k) \Delta k. \quad (16)$$

Воспользуемся приближением заданного поля, т. е. будем считать, что амплитуда падающей волны является постоянной и равной A_0 . Тогда, учитывая равенство (11) и возвращаясь к пространственной частоте, получаем окончательное выражение для амплитуды $A^{(-)}$ и, соответственно, спектральной плотности интенсивности I отраженной волны, в виде функционалов от изменения показателя преломления как функции z :

$$A^{(-)}(\xi) = B_0 \int n_M(z) e^{i\xi z} dz. \quad (17)$$

$$I(\lambda) = \left| A^{(-)}\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \right|^2, \quad (18)$$

где B_0 — постоянная, зависящая от амплитуды падающей волны и отстройки от длины волны Брэгга $B_0 = \Delta k A_0 / 2$.

Таким образом, из фундаментального уравнения (1) при условии выполнения (13) получены выражения (17) и (18) для амплитуды отраженной волны и спектральной плотности интенсивности отраженной волны.

Расчет зависимости спектральной плотности интенсивности отраженной волны от параметров неоднородной деформации и длины решетки Брэгга

Для одномодового ненагруженного волокна изменение показателя преломления, формирующее брэгговскую решетку, можно описать так называемой основной гармоникой решетки. В терминах функции, введенной в формуле (2), это значит, что

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_B} z\right), \quad (19)$$

где Λ_B — период ВБР; Δn — амплитуда модуляции показателя преломления.

Как показано в работе [11], при деформации оптоволокна в условиях рассмотренной там механической задачи поверхности неоднородностей показателя преломления определяющие ВБР смещаются на разные расстояния в зависимости от их положения и изменяют свою форму в цилиндрических координатах z и r . При этом получающееся распределение показателя преломления $\tilde{n}(r, z)$, которое описывает деформированную ВБР, можно записать так:

$$\tilde{n}(r, z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_B}(z - w(r, z))\right), \quad (20)$$

где $w(r, z)$ — продольная компонента вектора смещения точек оптоволокна в зависимости от z и r при приложении нагрузки.

Фактически (20) означает, что структура, формирующая ВБР, перестает быть одномерной. В случае одномодового волокна поперечную зависимость показателя преломления можно учесть с помощью соответствующего изменения коэффициента связи между падающей и отраженной волнами [8]. Этой проблеме, как отмечено выше, будет посвящена отдельная статья. В настоящей работе будем предполагать выполнение условия малости отклонения формы неоднородностей решетки от плоскости:

$$|w(R, z) - w(0, z)| \ll \lambda, \quad (21)$$

где R — радиус сердцевины оптоволокна.

В этом случае искривленные поверхности решетки Брэгга представляются идеальными плоскостями, продольное смещение которых описывается усредненной по поперечному сечению компонентой вектора $\bar{w}(z)$. В этом приближении в спектре отраженного излучения будет присутствовать один явно выраженный максимум, смещение которого является функцией неоднородной деформации ВБР.

Отметим, что для одномодового оптоволокна радиус сердцевины, в которой формируется брэгговская решетка, в 10–20 раз меньше радиуса оптоволокна. Таким образом, сформулированное выше условие (21) будет выполняться с высокой точностью для большого числа практически важных случаев. В данном приближении возникающие при деформации отклонения от плоской картины участков неоднородностей

ВБР — небольшие (около 1 % [11]) и будут мало влиять на спектральную плотность интенсивности отраженного сигнала. Основной вклад в ее изменение при деформации ВБР будет давать неэквидистантность осевого сдвига участков неоднородностей. С учетом принятого приближения считаем, что

$$\tilde{n}(r, z) = \tilde{n}(z). \quad (22)$$

Таким образом, как следует из формул (19), (20), (22), введенная в (3) величина $n_M(z)$, принимает вид:

$$n_M(z) = \frac{2}{n_0} \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_B}(z - \bar{w}(z))\right). \quad (23)$$

Отсюда формула для интенсивности (18) полностью определена равенствами (17) и (23).

Приведем порядок и результаты расчетов спектральной плотности интенсивности отраженной волны в зависимости от длины решетки Брэгга и значения деформации.

При малых деформациях функцию, описывающую продольную деформацию в зависимости от координаты z , можно представить в виде:

$$\bar{w}(z) = \alpha z + \beta z^3, \quad (24)$$

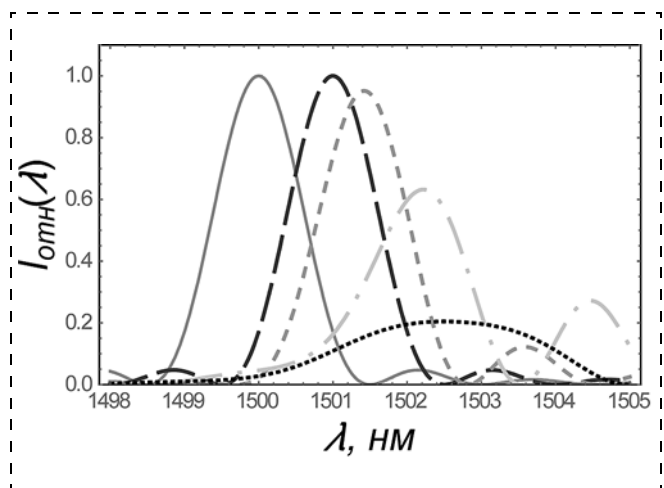


Рис. 1. Зависимость относительной спектральной плотности интенсивности отраженного света от продольной деформации ВБР при $L = 0,75 \cdot 10^6$ нм:

сплошная линия — интенсивность отражения недеформированной ВБР; длинный штрих — линейная деформация при $\beta = 0$ в (24); короткий штрих — нелинейная деформация при $\beta = 5\alpha \cdot 10^{-12}$, штрих-пунктир — то же самое при $\beta = 5\alpha \cdot 10^{-11}$, пунктир — то же самое при $\beta = 5\alpha \cdot 10^{-11}$

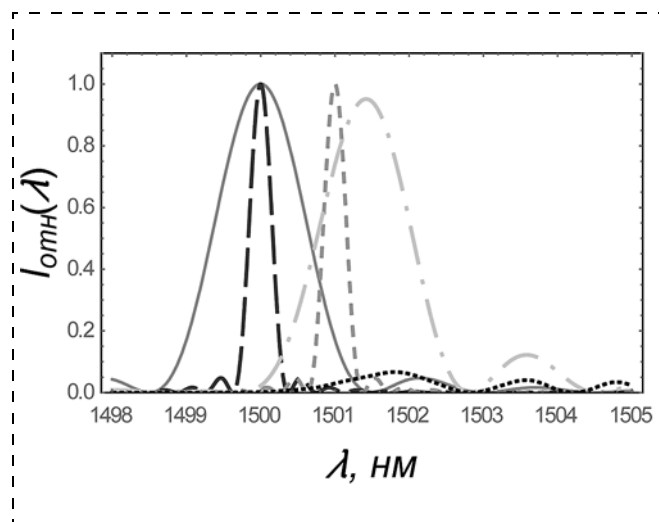


Рис. 2. Зависимость относительной спектральной плотности интенсивности отраженного света при растяжении решетки для различных параметров нелинейности деформации:

сплошная линия — интенсивность отражения недеформированного оптоволокна при $L = 0,75 \cdot 10^6$ нм; длинный штрих — недеформированное оптоволокно при $L = 3 \cdot 10^6$ нм; короткий штрих — линейная деформация при $\beta = 0$ в (24) и $L = 3 \cdot 10^6$ нм, штрих-пунктир — нелинейная деформация при $\beta = 5\alpha \cdot 10^{-11}$ и $L = 0,75 \cdot 10^6$ нм; пунктир — нелинейная деформация при $\beta = 5\alpha \cdot 10^{-11}$ и $L = 3 \cdot 10^6$ нм

где α и β — коэффициенты при линейной и нелинейной частях функции деформации соответственно, деформация измеряется в нанометрах.

При расчетах значение линейного коэффициента в (24) принимали равным $\alpha = 6,662 \cdot 10^{-4}$. Это значение обеспечивает при чисто линейной деформации, т. е. при $\beta = 0$, сдвиг максимума интенсивности отраженной волны на 1 нм. При расчетах первоначальную длину решетки брали равной $L = 0,75 \cdot 10^6$ нм, период решетки не изменяли и брали равным $\Lambda_B = 750$ нм.

На рис. 1 показана зависимость интенсивности отраженной волны по отношению к интенсивности падающей волны, умноженной на значение отстройки при различных деформациях оптоволокна. Как видно из рис. 1, нелинейная деформация существенно изменяет характер отражения на ВБР и при $\beta = 5\alpha \cdot 10^{-11}$ ВБР фактически теряет свои свойства. Наличие нелинейной деформации существенно ограничивает возможности увеличения эффективности ВБР. Одним из путей повышения эффективности является увеличение длины решетки, что приводит к увеличению избирательности ВБР, т. е. к уменьшению ширины полосы отражения.

На рис. 2 изображена зависимость относительной спектральной плотности интенсивности (ОСПИ) отраженного света от длины ВБР и нелинейности.

Как видно из рис. 2, увеличение длины решетки в 4 раза существенно уменьшает ширину полосы отражения. Однако в случае нелинейности при $\beta = 5\alpha \cdot 10^{-11}$ в выражении (24) отражательная способность ВБР с $L = 3 \cdot 10^6$ нм уменьшается фактически до нуля.

Таким образом, учет нелинейности деформации оптоволокна является принципиальным при конструировании датчиков на ВБР. Учет только линейной деформации или расчеты с постоянной деформацией практически во всех известных моделях датчиков являются явно недостаточными.

Построенная модель с учетом точного решения задачи деформации оптоволокна в работе [11] охватывает достаточно широкий круг практически важных задач. В частности, сформулированная модель открывает существенные возможности при поиске новых материалов с заданными упругими характеристиками для сенсорно-актюаторных элементов новых типов датчиков на основе ВБР (см., например, [2]).

Заключение

В работе на основании фундаментальных уравнений электродинамики и оптики сформулирована математическая модель отраженного оптического сигнала при неоднородной продольной деформации внутриволоконной брэгговской решетки. Математическая модель построена при использовании общепринятых приближений для описания прохождения световой волны в неоднородных оптических средах: приближения медленно меняющихся амплитуд; так называемого приближения заданного поля, при котором амплитуда падающей волны считается постоянной; приближения малой отстройки длины падающей волны от длины волны Брэгга, а также приближения слабого затухания света в оптоволокне. При использовании результатов работы [11] построенная модель позволяет связать фундаментальные упругие характеристики вещества с оптическими характеристиками, влияющими на процессы прохождения света через оптоволокно. Для случая искажения периода ВБР при нелинейной деформации оптоволокна проведен

расчет зависимости относительной интенсивности отраженной световой волны от длины решетки и значения деформации. Найдены возможные ограничения на параметры брэгговских решеток и значения нелинейных деформаций, позволяющие на фундаментальном уровне оценивать достижимые пределы повышения точности датчиков на ВБР.

Список литературы

1. **Леонович Г. И., Олешкевич С. В.** Гибридные датчики на волоконно-оптических брэгговских решетках // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4 (7). С. 1340—1345.
2. **Борисенков И. Л., Еремин Р. А., Крутов А. Ф., Медриш И. В.** Особенности применения геометрико-топологического анализа при поиске новых магнитострикционных материалов для гибридных оптоволоконных датчиков на брэгговских решетках // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 10. С. 595—605.
3. **Yang M.** Optical Fiber Sensors with Coatings as Sensitive Elements // *Asia Communications and Photonics Conference*, 2014, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper AF11.1. URL: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ACPC-2014-AF11.1> (дата обращения 05.04.2020).
4. **Карпов С. Ю., Столяров С. Н.** Распространение и преобразование волн в средах с одномерной периодичностью // Успехи физических наук. 1993. Т. 163, № 1. С. 63—89.
5. **Столяров С. Н.** Соответствие решений в приближении сильной и слабой связи для волн в одномерных периодических структурах // Краткие. Сообщения по физике. ФИАН (КСФ). 1987, № 11. С. 12—14.
6. **Пискер З. Г.** Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в идеальных кристаллах. М.: Наука, 1974. 369 с.
7. **Беляков В. А.** Дифракционная оптика периодических сред сложной структуры. М.: Наука, 1988. 255 с.
8. **Kogelnik H.** Coupled wave theory for thick hologram grating // *The Bell System Technical Journal*. 1969. Vol. 48, N. 9. P. 2909—2947.
9. **Элаши Ш.** Волны в активных и пассивных периодических структурах // Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ТИИЭР). 1976. Т. 64, № 12. С. 22—57.
10. **Мартьянов Н. Н., Столяров С. Н.** К теории распространения волн в периодических структурах // Квантовая электроника. 1978. Т. 5, № 8. С. 1853—1855.
11. **Борисенков И. Л., Федечев А. Ф., Леонович Г. И., Куприянов С. В., Крутов А. А., Захаров В. Н.** Математическая модель неравномерной микромеханической деформации участка оптического волокна при осесимметричном нагружении // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 6. С. 331—336.
12. **Бредов М. М., Румянцев В. В., Топтыгин И. Н.** Классическая электродинамика. М.: Наука, 1985. 400 с.

I. L. Borysenkov¹, Ph. D., Vice-Chairman of Council, borysenkov46@yandex.ru,
A. F. Krutov², Professor, krutov@ssau.ru,
N. P. Kozlov², Ph. D., Associate Professor, knp-box@yandex.ru,
G. I. Leonovich¹, Representative of Section of Council in Samara Region, Professor, leogi1@mail.ru,
V. I. Nikonov², Ph. D., Associate Professor, nikon5919@mail.ru,
V. N. Zakharov², Graduate Student, ZaharoffV@inbox.ru,

¹ Applied Problem Council of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333, Russian Federation

² Samara University, Samara, 443086, Russian Federation

A Mathematical Model of the Reflected Optical Signal with an Inhomogeneous Longitudinal Deformation of an Fiber Bragg Grating

Received on June 17, 2020

Accepted on June 22, 2020

The relevance is shown and a new sequential mathematical model of the optical signal for nonlinearly deformable quasi-periodic one-dimensional fiber Bragg gratings is proposed. The dependence of the relative spectral density of the intensity of the reflected light flux on the inhomogeneity parameters of longitudinal deformation is determined. The model is based on the fundamental equations of electrodynamics and optics and is built in the framework of generally accepted approximations.

Keywords: fiber optic sensors and devices, fiber Bragg grating, nonlinear strain, spectral density

For citation:

Borysenkov I. L., Krutov A. F., Kozlov N. P., Leonovich G. I., Nikonov V. I., Zakharov V. N. A Mathematical Model of the Reflected Optical Signal with an Inhomogeneous Longitudinal Deformation of an Fiber Bragg Grating, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 7, pp. 361–368.

DOI: 10.17587/nmst.22.361-368

References

1. **Leonovich G. I., Oleshkevich S. V.** Hybrid sensors on fiber-optic Bragg gratings, *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, vol. 18, no. 4 (7), 2016, pp. 1340–1345.
2. **Borysenkov I. L., Eremin R. A., Krutov A. F., Medrish I. V.** Features of the application of geometric topological analysis in the search for new magnetostrictive materials for hybrid optical fiber sensors on Bragg gratings, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 10, pp. 595–605.
3. **Yang M.** Optical Fiber Sensors with Coatings as Sensitive Elements, *Asia Communications and Photonics Conference*, 2014, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper AF11.1. URL: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ACPC-2014-AF11.1> (date of access 05.04.2020).
4. **Karpov S. Yu., Stolyarov S. N.** Propagation and transformation of electromagnetic waves in one-dimensional periodic structures, *Phys. Usp.* 1993, vol. 36, no. 1, pp. 1–22.
5. **Stolyarov S. N.** Solutions in the strong and weak coupling approximation for waves in one-dimensional periodic structures, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 1987, № 11, pp. 12–14 (in Russian).
6. **Pisker Z. G.** Dynamic X-ray scattering in ideal crystals, Moscow, Nauka, 1974, 369 p. (in Russian).
7. **Belyakov V. A.** Diffraction optics of periodic media of complex structure, Moscow, Nauka, 1988, 255 p. (in Russian).
8. **Kogelnik H.** Coupled wave theory for thick hologram grating, *The Bell System Technical Journal*, 1969, vol. 48, no. 9, pp. 2909–2947.
9. **Elashi Sh.** Waves in active and passive periodic structures, *The Bell System Technical Journal*, 1969, vol. 48, no. 9, pp. 2909–2947.
10. **Martynov N. N., Stolyarov S. N.** Theory of wave propagation in periodic structures, *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1978, vol. 5, pp. 1056–1057.
11. **Borysenkov I. L., Fedechev A. F., Leonovich G. I., Kupriyanov S. V., Krutov A. A., Zakharov V. N.** A Mathematical Model of a Non-uniform Micromechanical Deformation of an Optical Fiber Segment with an Axial Symmetric Surface Stressing, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 6, pp. 336–341.
12. **Bredov M. M., Rumyantsev V. V., Toptygin I. N.** Classical electrodynamics, Moscow, Nauka, 1985, 400 p. (in Russian).

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

УДК 666.798.2:621.311.6

DOI: 10.17587/nmst.22.369-374

А. В. Любимов, генеральный директор, e-mail: opteks2008@yandex.ru,
Закрытое акционерное общество "Научно-производственное предприятие "Оптические
и электронные комплексы и системы", Москва,
Г. В. Коровин, директор программ,
Научно-исследовательский институт космических систем имени А. А. Максимова",
Королев, МО,
Е. А. Иванов, руководитель схемотехнического отдела, e-mail: opteks2008@yandex.ru,
Закрытое акционерное общество "Научно-производственное предприятие
"Оптические и электронные комплексы и системы", Москва

КОНЦЕПЦИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДВУХСТОРОННИХ КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ ДЛЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ АЛЮМОНИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ С ПЕРЕХОДНЫМИ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

Поступила в редакцию 29.05.2020

Предлагаемая концепция предполагает формирование усиленных переходных отверстий в коммутационных керамических платах для трассировки цепей с токами до 30 А. Такие переходные отверстия упрощают трассировку высокомогущных цепей в схемах устройств силовой электроники и позволяют снизить вероятность перегрева проводников.

На основе представленной концепции создан преобразователь энергии, удельная пиковая мощность которого при габаритных размерах $75 \times 85 \times 11$ мм составила $7,75$ кВт/дм³, что превосходит мощность отечественных и зарубежных аналогов.

Ключевые слова: алюмонитридная керамика, лазерная обработка, переходные отверстия, металлизация, гальваническое осаждение

Преобразователи энергии в силовой микроэлектронике

Разработка преобразователей энергии мощностью от 200 до 1000 Вт связана с необходимостью решения проблемы отвода теплоты от активных компонентов. Данная проблема вызвана ограниченными размерами таких преобразователей и высокими требованиями к удельной мощности устройств.

Требуемый отвод теплоты может быть достигнут применением материалов на основе керамики для производства коммутационных плат. Выбор керамических материалов объясняется их высокой теплопроводностью, которая позволяет монтировать коммутационную плату непосредственно на базовое металлическое основание, обеспечивая малое тепловое сопротивление перехода между платой и основанием.

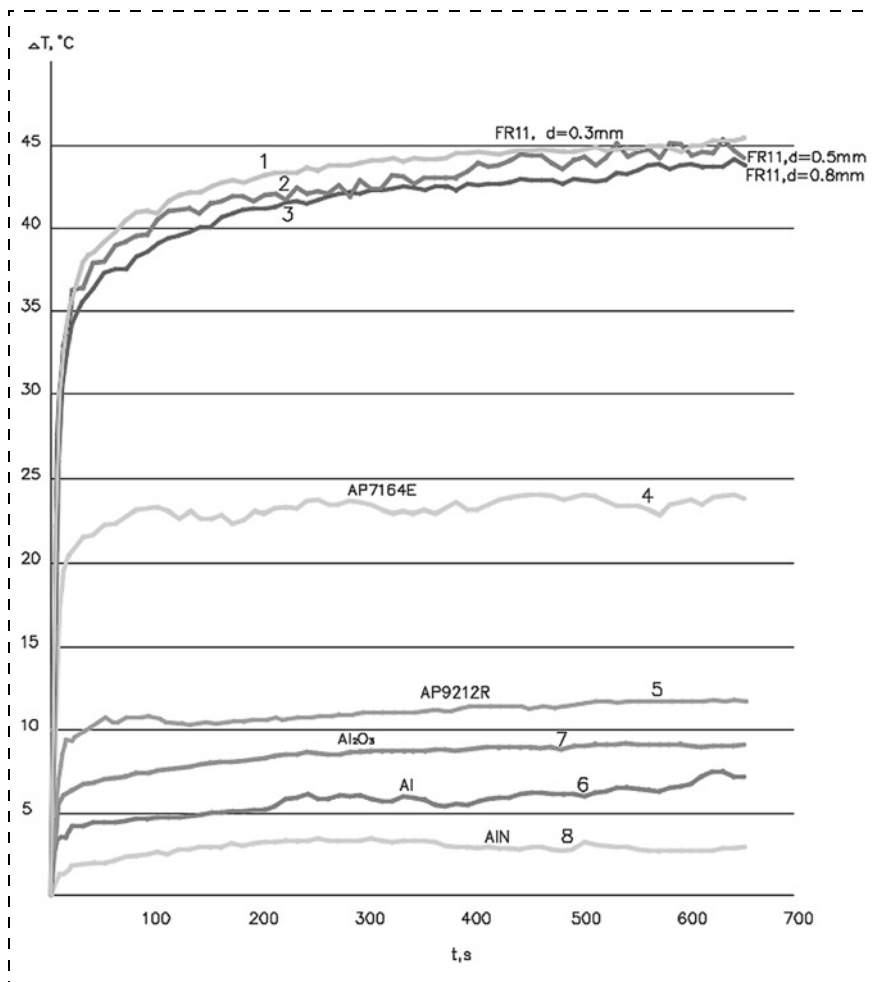


Рис. 1. Испытание образцов различных материалов на возможность отвода теплоты:

d — толщина стеклотекстолитового материала

Сравнительная оценка возможности отвода теплоты основных материалов, используемых для изготовления коммутационных плат, представлена на рис. 1.

Испытания проводили на следующих материалах:

1 — стеклотекстолит FR11 толщиной 0,3 мм с медной фольгой 105 мкм;

2 — стеклотекстолит FR11 толщиной 0,5 мм с медной фольгой 105 мкм;

3 — стеклотекстолит FR11 толщиной 0,8 мм с медной фольгой 105 мкм;

4 — полиимид Pyralux AP71164E;

5 — полиимид Pyralux AP9212R;

6 — алюминий толщиной 1 мм с толщиной медной фольги 105 мкм;

7 — керамическая плата на основе оксида алюминия толщиной 630 мкм с медной фольгой 300 мкм;

8 — керамическая плата на основе нитрида алюминия толщиной 630 мкм с медной фольгой 300 мкм.

В результате испытаний выяснили, что теплопроводность керамики более чем на два порядка выше соответствующих показателей полимерных материалов, традиционно используемых для производства коммутационных плат: 24 Вт/(м·К) — для алюмооксидной керамики; 180...200 Вт/(м·К) — для алюмонитридной керамики; 0,1...0,5 Вт/(м·К) — для полимеров соответственно. При плотном контакте коммутационной платы с базовым металлическим основанием создаются условия для надежного отвода теплоты даже при высокой удельной мощности преобразователя энергии.

Кроме того, использование керамических материалов в конструкции коммутационных плат дает ряд дополнительных преимуществ [1—6]:

- механическую стабильность и сохранение линейных размеров;
- хорошие электрические характеристики (в том числе в СВЧ диапазоне);
- высокую радиационную стойкость;
- стабильность эксплуатационных параметров в широком диапазоне изменения свойств окружающей среды (в частности, температуры и влажности).

Тем не менее в применении керамических материалов существует ряд трудностей, вызванных их хрупкостью:

в отличие от полиимидных и стеклотекстолитовых материалов, в которых создание переходных отверстий возможно традиционными механическими и химическими способами (сверление, травление полиимиды), для керамики такие способы не подходят;

при разработке коммутационных плат следует учитывать, что монтаж и фиксацию такой платы в корпус устройства опасно выполнять винтовыми соединениями, это может привести

к растрескиванию основы коммутационной платы.

Особенности предлагаемой концепции

В представленной концепции изготовления двухсторонних коммутационных плат для наибольшей теплоотдачи рекомендуется использовать алюминитридную основу. Указанный материал выбран исходя из результатов испытаний материалов на возможность отвода теплоты.

Для отработки технологии изготовления предлагаемых коммутационных плат был выбран преобразователь энергии мощностью 250 Вт, изготавливаемый компанией ЗАО "НПП "ОПТЭКС".

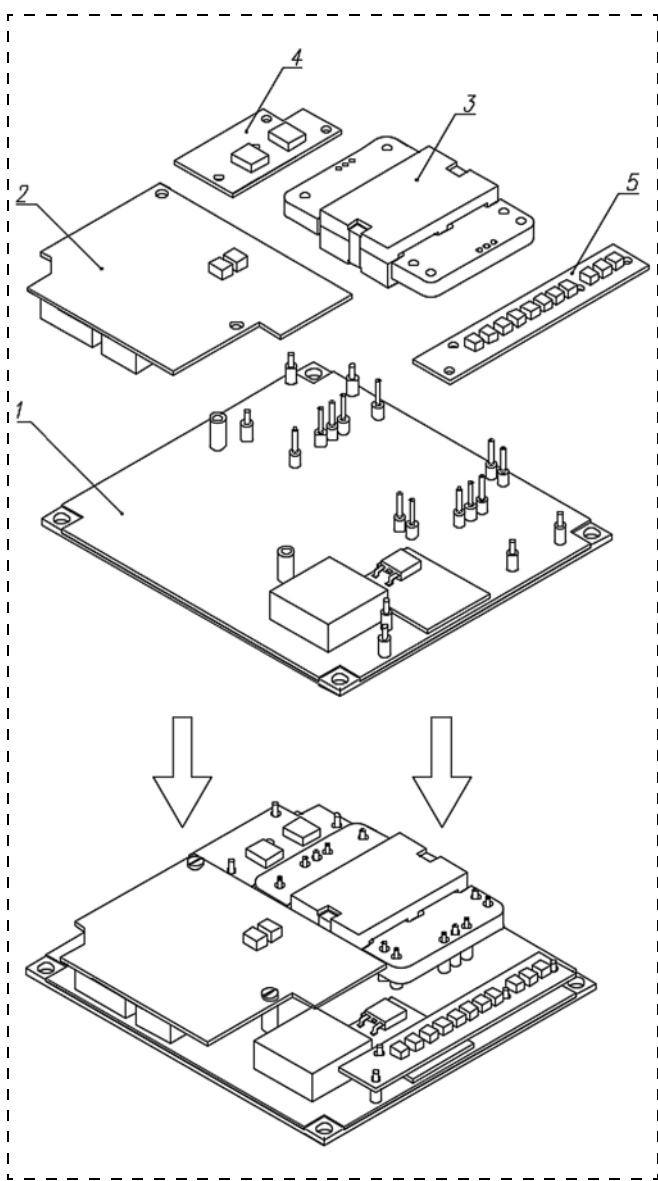


Рис. 2. Макетный образец преобразователя энергии с коммутационной платой, выполненной по предложенной концепции

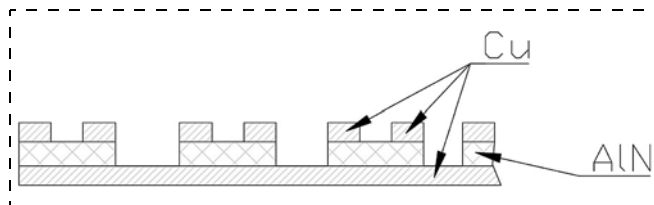


Рис. 3. Этап формирования переходного отверстия

В целях минимизации размеров выбранного преобразователя (рис. 2) было решено изготовить алюминитридную коммутационную плату 1, на которой располагаются силовые цепи и активные компоненты (транзисторы первичной обмотки и транзисторы цепи синхронного выпрямления нуждаются в значительном отводе теплоты).

Планарный трансформатор 3, фильтры 4 и 5 и плата управления 2 могут быть выполнены из стеклотекстолитовых или полиимидных материалов, поскольку не нуждаются в значительном отводе теплоты.

Для дополнительного снижения высоты готового преобразователя энергии планарный трансформатор 3 может быть выполнен в составе печатной платы [7].

Первоначально заготовка алюминитридной коммутационной платы представляет собой слой керамики толщиной 130 мкм и накатанной с двух сторон медной фольги толщиной по 300 мкм. После создания топологического рисунка на верхней поверхности коммутационной платы требуется сформировать переходные отверстия, для этого была использована операция лазерной обработки поверхности до нижнего слоя фольги (рис. 3).

После лазерной обработки поверхность меди обогащается алюминием с образованием алюминиевой бронзы. Для проведения последующего гальванического осаждения меди требуется выполнить обработку поверхности "колодца" (рис. 4).

Механические способы очистки могут привести к разрушению керамического материала, поэтому в нашей концепции мы предлагаем проводить напыление тонкого медного слоя, который будет служить основой для последующих операций зарастивания отверстий (рис. 5).

Последующая операция гальванического зарастивания "колодцев" переходных отверстий медью происходит до заполнения "колодца". Этап зарастивания "колодца" представлен на рис. 6.

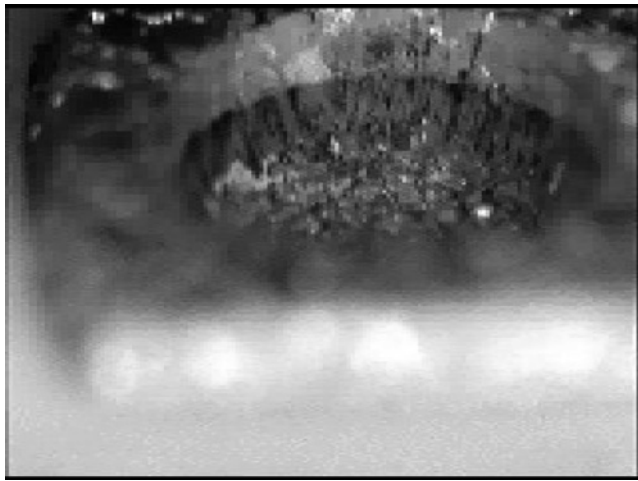


Рис. 4. Сформированный лазером "колодец" в алюминитридной коммутационной плате до запыления слоем меди

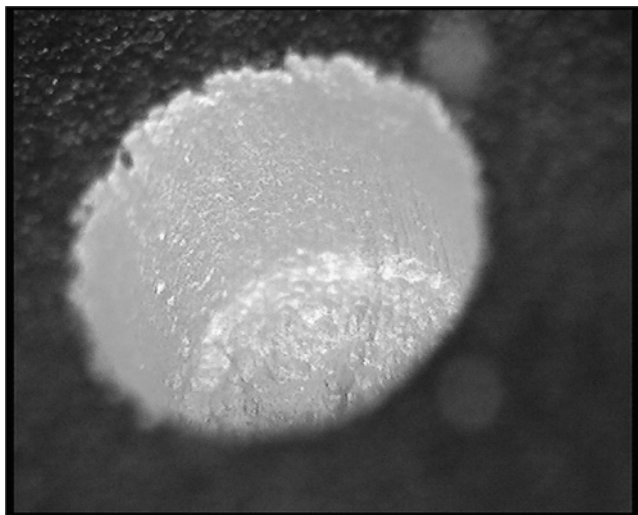


Рис. 5. Запыленный тонким слоем меди "колодец" переходного отверстия

Во избежание осаждения меди на проводниках топологического рисунка верхней стороны — рекомендуется закрывать медную поверхность полиимидным скотчем.

Альтернативная технология создания переходных металлизированных отверстий позволила осуществить создание топологического рисунка меди на обоих слоях керамической подложки. Двусторонняя трассировка в совокупности с существующей методикой коммутации силовых ключей [8] позволила сократить площадь преобразователя энергии, определяемую площадью керамической платы, с 7650 до 6957 мм².

Помимо формирования переходных отверстий остается сложность монтажа керамической

коммутационной платы в готовое устройство. Для решения этой проблемы предлагаем расплавить керамическую коммутационную плату на медное основание, имеющее окна в области топологического рисунка и оборудованное монтажными отверстиями для фиксации преобразователя.

В указанном способе спайки коммутационной платы и медного основания требуется учитывать разный коэффициент линейного теплового расширения меди и алюминитридной керамики. Чтобы избежать изгиба сборки после пайки и растрескивания керамики была использована съемная пластина из ковара (рис. 7), ко-



Рис. 6. Этап гальванического заравнивания "колодца" переходного отверстия

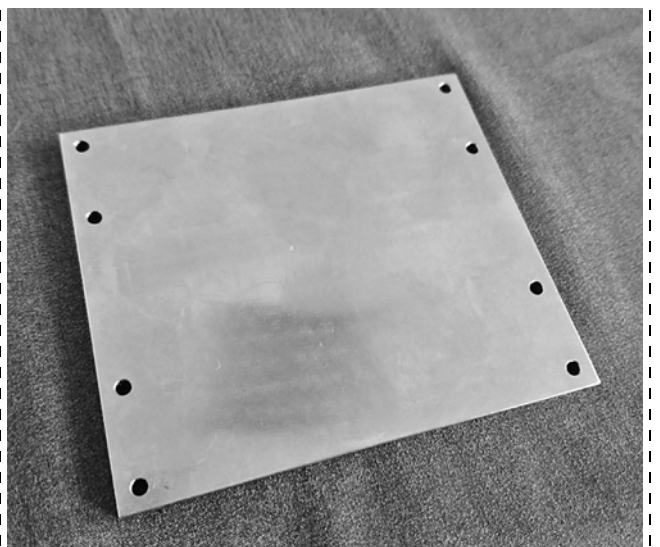


Рис. 7. Пластина из ковара для крепления медного основания и препятствия изгибу коммутационной платы при пайке

Характеристики преобразователей энергии

Характеристика	Изготовленный образец	МДМ240-П "Александр Электрик", Россия	CN200A "TDK Lambda", Япония
Выходное напряжение, В	28	28	24
Номинальная мощность, Вт	250	240	200
Удельная мощность, кВт/дм ³	3,26	1,81	2,86
Пиковая мощность, Вт	650	—	—
Пиковая удельная мощность, кВт/дм ³	7,75	—	—
Высота преобразователя, мм	11	13	12,7
Объем преобразователя, дм ³	0,075	0,133	0,07
КПД при номинальной нагрузке, %	88,6	87	88
Частота преобразования, кГц	500	100	150
Масса, г	103	115	100

тору на время пайки крепили с обратной стороны медного основания (рис. 8).

Пайку основания и керамической платы проводили в условиях вакуума, для предотвращения окисления меди.

Достигнутые результаты

На основе предлагаемой концепции изготовления двухсторонних коммутационных плат для силовой электроники на основе DBC-керамики с переходными металлизированными отверстиями был разработан преобразователь энергии, полученные характеристики которого представлены в таблице и сопоставлены с характеристиками ведущих отечественных и зарубежных аналогов.

Исходя из данных таблицы, можно сделать вывод о целесообразности и перспективности разработки преобразователей энергии на основе

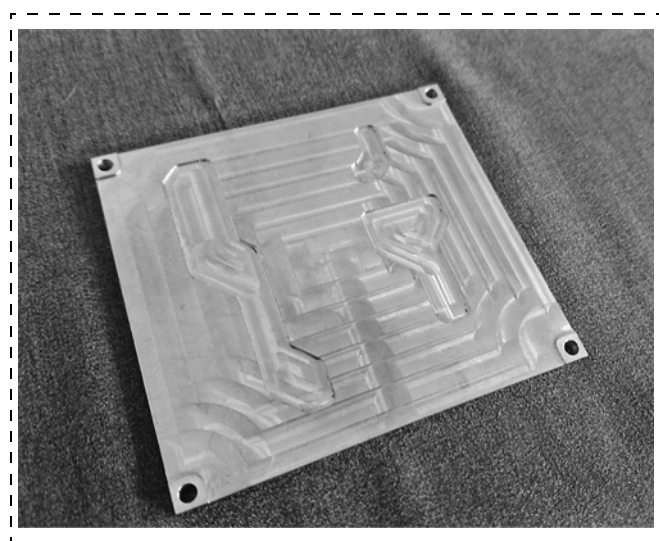


Рис. 8. Медное основание коммутационной платы

предлагаемой концепции. Значение удельной мощности разработанного преобразователя, составляющее 3,26 кВт/дм³, превосходит соответствующие показатели у отечественных и зарубежных аналогов. При работе на импульсную нагрузку преобразователь энергии имеет значение пиковой удельной мощности 7,75 кВт/дм³ при выходной мощности 650 Вт.

Список литературы

1. **Лейтс И. Л.** Перспективы развития техники печатных плат и микросборок. "Что было — что будет" // Технологии в электронной промышленности. 2011. № 7. С. 40—42.
2. **Нака К.** LFC-технология производства керамических подложек для автомобильной промышленности // Компоненты и технологии. 2007. № 5. С. 170—172.
3. **Глубоков А. А., Бондарь Д. Б., Шелковников Б. Н.** Широкополосные трансформаторы для интегральных схем в технологии LTCC // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2006. № 3. С. 26—31.
4. **Чигиринский С.** Особенности и преимущества производства многослойных структур на основе керамики (LTCC, HTCC, MLCC) // Компоненты и технологии. 2009. № 11. С. 130—131.
5. **Егоров Г., Капкин С., Стельмахович Л., Трофименков В., Хрипко В.** Многослойные керамические микросхемы. Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 3. С. 60—65.
6. **Жданкин В.** Радиационно-стойкие гибридно-пленочные DC/DC-преобразователи — стандартные компоненты систем электропитания КА // Аппаратные средства. 2012. № 1. С. 26—41.
7. **Любимов А. В., Иванов Е. А., Коровин Г. В., Королев А. Н.** Планарный трансформатор / Патент № 176671 РФ от 25.01.2018.
8. **Иванов Е. А.** Методика уменьшения значения коммутируемого напряжения в силовых ключах обратных источников питания // Нано- и микросистемная техника. 2017. Том 19, № 11. С. 694—698.

A. V. Lyubimov, General Manager, e-mail: opteks2008@yandex.ru,
Scientific and Production Enterprise "Optical and Electronic Complexes and Systems", Moscow
G. V. Korovin, Program Director,
"Research Institute of Space Systems named after A. A. Maximov", Korolyov, MO,
E. A. Ivanov, Head of Circuit Engineering Department, e-mail: opteks2008@yandex.ru,
Scientific and Production Enterprise "Optical and Electronic Complexes and Systems", Moscow

Corresponding author:

Lyubimov Andrey V., General Manager, Scientific and Production Enterprise "Optical and Electronic Complexes and Systems", Moscow, e-mail: opteks2008@yandex.ru

The Concept of Manufacturing Double-Sided Patch Boards for Power Electronics Based on Aluminide Ceramics with Transitional Metallized Holes

Received on May 29, 2020

Accepted on June 10, 2020

The proposed concepts involve the use of reinforced vias in switching circuits for tracing up to 30 A. This is due to the ways of galvanic transformation of the laser into laser-pre-layered wells in the circuit board. Such vias simplify the routing of high-power circuits in power electronics circuits and reduce the likelihood of overheating of conductors.

In addition to the formation of vias in the proposed base, it is proposed to use a board made of carpet to prevent bending of structures from different coefficients of linear thermal expansion.

Based on the presented concept, an energy converter was created, the specific peak power of which at dimensions $75 \times 85 \times 11$ mm was 7.75 kW/(dm³), which surpasses domestic and foreign analogues.

Keywords: aluminum nitride, ceramic, laser processing, vias, metallization, galvanic deposition.

For citation:

Lyubimov A. V., Korovin G. V., Ivanov E. A. The Concept of Manufacturing Double-Sided Patch Boards for Power Electronics Based on Aluminide Ceramics with Transitional Metallized Holes, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 7, pp. 369–374.

DOI: 10.17587/nmst.22.369-374

References

1. **Lejts I. L.** Perspektivy razvitiya tekhniki pechatnyh plat i mikrosborok. "Chto bylo — chto budet", *Tekhnologii v ehlektronnoy promyshlennosti*, 2011, no. 7, pp. 40–42 (in Russian).
2. **Haka K.** LFC-technology for the production of ceramic substrates for the automotive industry, *Components and technologies*, 2007, no. 5, pp. 170–172.
3. **Glubokov A. A., Bondar' D. B., Shelkovnikov B. N.** SHirokopolosnyye transformatory dlya integral'nyh skhem v tekhnologii LTCC, *Tekhnologiya i konstruirovaniye v ehlektronnoy apparature*, 2006, no. 3, pp. 26–31 (in Russian).
4. **Chigirinskij S.** Osobennosti i preimushchestva proizvodstva mnogoslojnyh struktur na osnove keramiki (LTCC, HTCC, MLCC), *Komponenty i tekhnologii*, 2009, no. 11, pp. 130–131 (in Russian).
5. **Egorov G., Kapkin S., Stel'mahovich L., Trofimenkov V., Hripko V.** Mnogoslojnyye keramicheskie mikroskhemmy. Nizkotemperaturnaya sovместno obzhigaemaya keramika, *Ehlektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, 2006, no. 3, pp. 60–65 (in Russian).
6. **Zhdankin V.** Radiacionno-stojkie gibridno-plenochnyye DC/DC-preobrazovateli — standartnyye komponenty sistem ehlektropitanija KA, *Obzor, Apparatnyye sredstva*, 2012, no. 1, pp. 26–41 (in Russian).
7. **Ivanov E. A., Lyubimov A. V., Korovin G. V., Korolyov A. N.** Planarniy transformator. Patent № 176671, published 25.01.2018.
8. **Ivanov E. A.** Metodika umen'shenija znachenija kommutiruemogo naprjazhenija v silovyh kljuchah obratnohodovyh istochnikov pitaniya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 11, pp. 694–698 (in Russian).

С. В. Булярский, д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр., bulyar2954@mail.ru,
Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, г. Москва,
В. В. Светухин, д-р физ.-мат. наук, проф., директор,
Научно-производственный комплекс "Технологический центр" г. Москва

РАСТВОРИМОСТЬ ПРИМЕСЕЙ В НАНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ

Поступила в редакцию 20.04.2020

Разработана термодинамическая модель растворимости примесей в нанокристаллах. Показано, что на растворимость оказывает влияние поверхностная энергия нанокристалла, поэтому с уменьшением его размеров растворимость примеси падает, затем приобретает дискретный характер, т. е. в нем может растворяться только счетное число атомов. В нанокристаллах, меньших определенного размера, примесь раствориться не может. Расчеты применяются к нанокристаллам кремния в оксиде этого материала.

Ключевые слова: нанокристаллы, растворимость примесей, влияние поверхности

Введение

Кремний является самым востребованным материалом в электронике. Его лидерство неоспоримо, однако имеют место ограничения на использование этого материала. Он имеет не прямой оптический переход между зоной проводимости и валентной зоной и поэтому монокристаллы кремния свет не излучают. Поглощение света кремнием происходит в ближней инфракрасной области спектра, поэтому приемники коротковолнового излучения на его базе также не эффективны и этот диапазон следует увеличить. Расширение сферы применения кремния является важной научной и коммерческой задачей. В связи с этим в настоящее время возникла и развивается электроника нанокристаллов, а именно кремниевые нанокристаллы (Si-НК), которые расширяют его применение в индустрии сенсоров, солнечной энергетике и кремниевой фотонике [1, 2]. Их использование растет в различных областях: светодиоды [3–5]; нелинейная оптика и системы связи [6]; фотовольтаика и солнечная энергетика [7–13]; термоэлектричество [14–16]; биомедицина [17, 18]. Растет использование Si-НК в интегральной и функциональной электронике [19].

Технология легирования наночастиц кремния является очень важной для кремниевой нанофотоники [20]. Интенсивность люминесценции таких кристаллов при легировании растет и мо-

жет достигать 10 %. Эти и другие экспериментальные результаты показывают, что легирование нанокристаллов кремния может существенно изменить оптические свойства частиц по сравнению с чистым материалом [21–23]. Легирование наночастиц кремния может изменять положение пика фотолюминесценции. В том числе были исследованы примеси замещения бора В и фосфора Р для нанокристаллов кремния диаметром до 2,2 нм и обнаружено, что легирование затрудняется, когда размеры Si-НК уменьшаются. Подобный эффект был обнаружен в работе [24]. В этой работе авторы добавляли в Si-НК примеси, которые должны были создать проводимость p -типа и n -типа, однако легирование было менее успешным, когда размеры нанокристаллов становились меньше некоторого критического значения [25]. Это связано с тем, что примесной атом должен преодолеть поверхностную энергию наночастицы для того чтобы попасть в ее ядро [26–29]. В работе [30] приводятся результаты по числу атомов бора в зависимости от диаметра наночастицы кремния Si-НК. Тем не менее расположение и термодинамическая стабильность легирующих примесей в Si-НК остаются неясными и представляют собой предмет дальнейшего исследования. В данной работе развита термодинамика растворения примесей в нанокристаллах, которая сопоставляется с экспериментальными результатами по растворению примесей в нанокристаллах кремния.

Термодинамика растворения примесей в нанокристаллах

Для моделирования растворимости примесей в нанокристаллах кремния используем термодинамические модели, созданные ранее для растворимости примесей [31], и влияние поверхности на растворимость [32]. Рассмотрим систему из полупроводникового кристалла конечных размеров, находящегося в равновесии с внешней фазой. Объем системы ограничен объемом, в котором происходит выращивание полупроводника. В такой системе нет обмена частиц с внешней средой, но есть обмен энергией, поэтому к ней можно применять метод минимума свободной энергии. Считаем, что в этой системе есть только два сорта атомов — A и B , причем атомы сорта A растворяются в кристалле, состоящем из атомов сорта B . Будем использовать следующие обозначения, где нижний индекс указывает на тип атома, а верхний индекс — место, в котором данный атом размещается: N^B — число атомов (A и B), из которых состоит кристалл B ; N_A^B — число атомов сорта A , находящихся в кристалле B ; N_B^B — число атомов сорта B в кристалле B ; N_A^L , N_B^L — число атомов сорта A и B , находящихся во внешней фазе. Свободная энергия такой системы имеет следующий вид:

$$G = G^L(N_A^L, N_B^L) + g_A^B N_A^B + (g_B^B N_B^B - G^S(N_B^B)) - kT \ln \frac{N^B!}{N_A^B! N_B^B!}. \quad (1)$$

Здесь G^L — свободная энергия внешней фазы; g_A^B — свободная энергия растворимости атомов сорта A в кристалле B ; g_B^B — свободная энергия, выделяющаяся при переходе атомов B из внешней фазы в кристалл; G^S — свободная энергия поверхности кристалла, значение которой зависит от размеров кристалла, а следовательно, от N_B^B . Последнее слагаемое в (1) является конфигурационной энтропией кристалла.

При минимизации свободной энергии необходимо учитывать следующие законы сохранения (уравнения связи):

$$\begin{aligned} \varphi_A &\equiv N_A - N_A^B - N_A^L = 0; \\ \varphi_B &\equiv N_B - N_B^B - N_B^L = 0; \\ \varphi^B &\equiv N^B - N_A^B - N_B^B = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Первые два выражения являются следствием закона сохранения числа частиц в замкнутой

системе, третье выражение является законом сохранения числа мест в решетке. Минимум свободной энергии (1) с дополнительными условиями (2) можно найти методом Лагранжа. Термодинамическое равновесие кристалла соответствует минимуму функционала:

$$\Psi = G + \lambda_A \varphi_A + \lambda_B \varphi_B + \lambda^B \varphi^B. \quad (3)$$

Здесь λ_A , λ_B , λ^B — множители Лагранжа.

Минимуму свободной энергии удовлетворяет решение:

$$N_A^B = N^B a_A \exp\left\{-\frac{\Delta g_A^B}{kT}\right\} \exp\left\{\left(\frac{\partial G^S(N_B^B)}{\partial N_B^B}\right) \frac{1}{kT}\right\}. \quad (4)$$

где $\Delta g_A^B = g_A^B - \mu_A^{L0}$ — изменение свободной энергии атома сорта A при его переходе из внешней фазы в кристалл; a_A — активность атомов A ; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура. Используя выражения для активности и энергии поверхности [31, 32], получаем для растворимости нейтральной примеси, например олова в кремнии,

$$N_{\text{Sn}}^{\text{Si}} = N^{\text{Si}} \exp\left\{\frac{\Delta G_{\text{Si}}}{kT}\right\} \times \exp\left\{-\frac{2\sigma(N_{\text{Si}}^{\text{Si}})^{-1/3}}{3kT}\right\} \exp\left\{-\frac{\Delta g_{\text{Sn}}^{\text{Si}}}{kT}\right\}, \quad (5)$$

где ΔG_{Si} — изменение свободной энергии при образовании монокристалла кремния; $N_{\text{Si}}^{\text{Si}}$ — число атомов в нанокристалле кремния; σ — коэффициент поверхностного натяжения в этом нанокристалле; $\Delta g_{\text{Sn}}^{\text{Si}}$ — изменение свободной энергии при легировании кремния оловом.

Для примеси, которая ионизируется при растворении, например фосфора в кремнии,

$$N_{\text{P}}^{\text{Si}} = N^{\text{Si}} \exp\left\{\frac{\Delta G_{\text{Si}}}{kT}\right\} \exp\left\{-\frac{2\sigma(N_{\text{Si}}^{\text{Si}})^{-1/3}}{3kT}\right\} \times \exp\left\{-\frac{\Delta g_{\text{P}}^{\text{Si}}}{kT}\right\} \left[\exp\left(\frac{E_F - \varepsilon_{\text{P}}^{\text{Si}}}{kT}\right) + 1 \right], \quad (6)$$

где $\Delta g_{\text{P}}^{\text{Si}}$ — изменение свободной энергии при легировании кремния фосфором; $E_F - \varepsilon_{\text{P}}^{\text{Si}}$ — энергетическое положение уровня фосфора относительно уровня Ферми.

Формулы (5) и (6) показывают, что с уменьшением размера Si-НК экспонента

$\exp\left\{-\frac{2\sigma(N_{\text{Si}}^{\text{Si}})^{-1/3}}{3kT}\right\}$ уменьшается и падает растворимость примеси.

Растворимость олова и фосфора в Si-НК

Для расчета растворимости фосфора и олова в нанокристаллах кремния различных размеров были использованы данные по растворимости примесей из работы [33]: параметр решетки кремния — 0,54 нм и коэффициент поверхностного натяжения расплавленного кремния — 0,92 Дж/м². Результаты расчетов показаны на рис. 1, а–г. Из них следует, что растворимость наночастиц размером более 30 нм близка к растворимости объемных кристаллов. Растворимость быстро падает, когда размер наночастицы уменьшается, и она становится дискретной, т. е.

в частице или кластере число атомов, которое можно сосчитать, растворяется. Граничный радиус наночастицы возникает, когда только один примесный атом может раствориться в кластере, и тогда примесь вообще не может быть растворена в этой маленькой наночастице. Этот факт является фундаментальным свидетельством влияния поверхностной энергии на свойства наночастиц и его необходимо учитывать при разработке технологических процессов. Описанные выше расчеты хорошо согласуются с результатами работы [34], в которой легированный фосфором Si-НК светился как нелегированные частицы, если их радиус был меньше 1,85 нм, однако при увеличении размера появлялось примесное свечение. Обоснование этого экспериментального результата простое, а именно: в Si-НК с размерами менее 1,3 нм (рис. 1, б) фосфор не может быть растворен. Рис. 2 иллюстрирует это явление

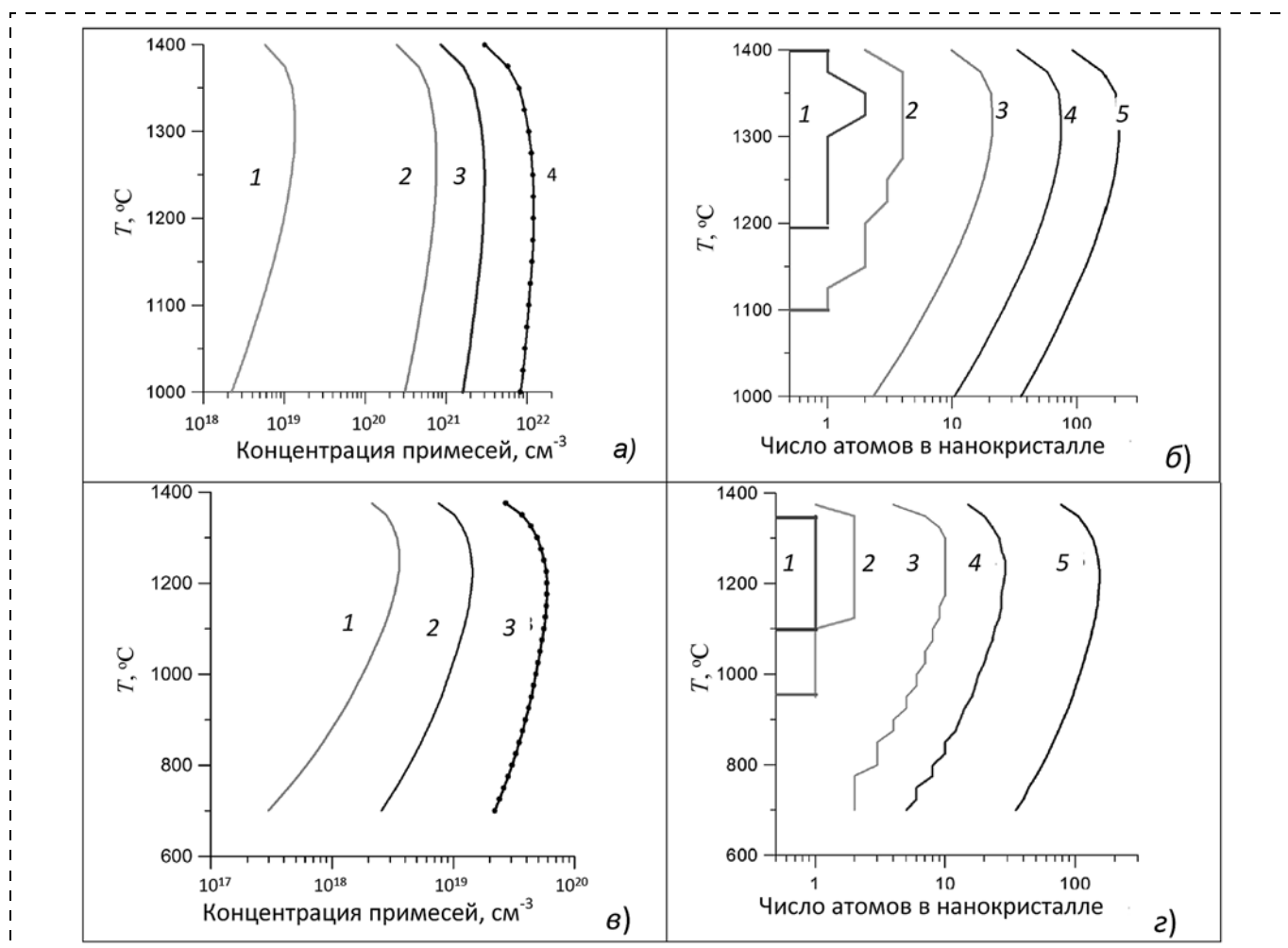


Рис. 1. Растворимость фосфора и олова в кремниевых нанокристаллах (Si-НК) разных размеров:

а — концентрация фосфора в Si-НК радиуса R , нм: 1 — 2; 2 — 5; 3 — 10; 4 — ∞; б — количество примесных атомов фосфора в наночастице радиуса R , нм: 1 — 1,3; 2 — 1,4; 3 — 1,6; 4 — 1,8; 5 — 2; в — концентрация олова в Si-НК радиуса R , нм: 1 — 5; 2 — 10; 3 — ∞; г — число примесных атомов олова в наночастице радиуса R , нм: 1 — 5; 2 — 6; 3 — 8; 4 — 10; 5 — 15

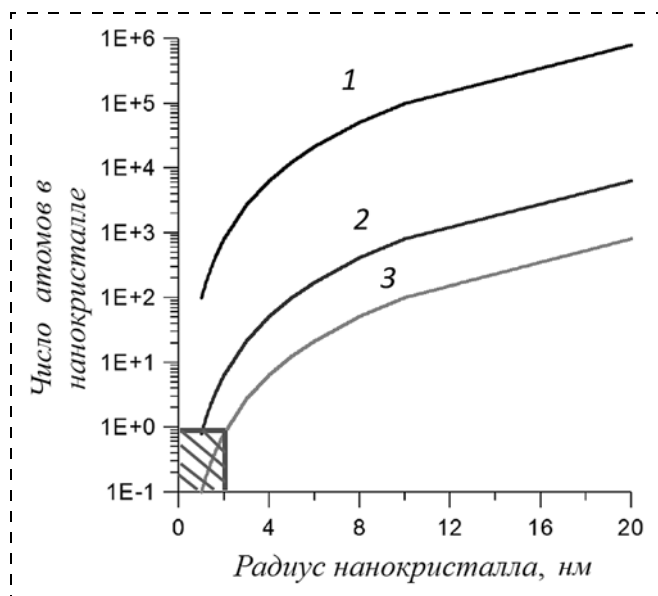


Рис. 2. Число атомов в наночастицах и нанокластерах определенного размера:

1 — атомы кремния; 2 — атомы фосфора; 3 — атомы олова

ние. Заштрихованная область показывает условия для Si-НК, легированного фосфором или оловом, когда примесь не может попасть в наночастицу ввиду барьера, создаваемого ее поверхностной энергией.

Заключение

Таким образом, разработанная термодинамическая модель по растворимости примесей в нанокристаллах хорошо согласуется с экспериментальными результатами по растворимости фосфора в кремнии. Эта модель может быть использована и для других типов кристаллов ультрамалого размера, например квантовых точек, в том числе в соединениях A^3B^5 .

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

Список литературы

1. Pavese L., Lockwood D. J. Silicon Photonics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004. 391 p.
2. Marri I., Degoli E., Ossicini S. Doped and codoped silicon nanocrystals: The role of surfaces and interfaces // Progress in Surface Science. 2017. Vol. 92, N. 4. P. 375–408.
3. Talapin D. V., Lee J. S., Kovalenko M. V., Shevchenko E. V. Prospects of colloidal nanocrystals for electronic and optoelectronic applications // Chem. Rev. 2010. Vol. 110. P. 389–458.
4. Gupta A., Khalil A. S. G., Offer M., Geller M., Winterer M., Lorke A., Wiggers H. Synthesis and ink-jet printing

of highly luminescing silicon nanoparticles for printable electronics // Nanotechnology. 2011. Vol. 11, N. 6. P. 5028–5033.

5. Daldosso N., Pavese L. Nanosilicon photonics // Laser Photon. Rev. 2009. Vol. 3, N. 6. P. 508–534.

6. Bisadi Z., Mancinelli M., Manna S., Tondini S., Bernard M., Samusenko A., Ghulinyan M., Fontana G., Bettotti P., Ramiro-Manzano F., Pucker G., Pavese L. Silicon nanocrystals for nonlinear optics and secure communications // Phys. Status Solidi A. 2015. Vol. 212. P. 2659–2671.

7. Priolo F., Gregorkiewicz F., Galli M., Krauss T. F. Silicon nanostructures for photonics and photovoltaics // Nat. Nanotechnol. 2014. Vol. 9, N. 1. P. 19–32.

8. Nozik A. J. Nanosciences and nanostructures for photovoltaics and solar fuels // Nano Lett. 2010. Vol. 10, No. 8. P. 2735–2741.

9. Conibeer G., Green M. A., König D., Perez-Würfl I., Huang S., Xiao X., Di D., Shi L., Shrestha S., Puthen-Veetil B., So Y., Zhang B., Wan Z. Silicon quantum dots based solar cells: addressing the issue of doping, voltage and current transport // Prog. Photovoltaics Res. Appl. 2011. Vol. 19. P. 813–824.

10. Mangolini L. Synthesis, properties, and applications of silicon nanocrystals // J. Vac. Sci. Technol., B. 2013. Vol. 31, N. 2. P. 020801.

11. Löper P., Canino M., López-Vidrier J., Schnabel M., Schindler F., Heinz F., Witzky A., Bellettato M., Allegrezza M., Hiller D., Hartel A., Gutsch S., Hernández S., Guerra R., Ossicini S., Garrido B., Janz S., Zacharias M. Silicon nanocrystals from high-temperature annealing: characterization on device level // Phys. Status Solidi A. 2013. Vol. 210. P. 669–675.

12. Summonte C., Allegrezza M., Bellettato M., Liscio F., Canino M., Desalvo A., López-Vidrier J., Hernández S., López-Conesa L., Estradé S., Peiró F., Garrido B., Löper P., Schnabel M., Janz S., Guerra R., Ossicini S. Silicon nanocrystals in carbide matrix // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2014. Vol. 128. P. 138–149.

13. Priolo F., Gregorkiewicz T., Galli M., Krauss T. F. Silicon nanostructures for photonics and photovoltaics // Nat. Nanotechnol. 2014. Vol. 9, N. 1. P. 19–32.

14. Dresselhaus M. S., Gang C., Ming Y. T., Ronggui Y., Hohyun L., Dezhi W., Zhifeng R., Fleurial J. P., Pawan G. New directions for low-dimensional thermoelectric materials // Adv. Mater. 2007. Vol. 19. P. 1043–1053.

15. Claudio T., Stein N., Stroppo D. G., Klobes B., Koz M. M., Kudejova P., Petermann N., Wiggers H., Schierner G., Hermann R. P. Nanocrystalline silicon: lattice dynamics and enhanced thermoelectric properties // Phys. Chem. Chem. Phys. 2014. Vol. 16. P. 25701–25709.

16. Tang J., Wang H. T., Lee D. H., Fardy M., Huo Z., Russell T. P., Yang P. Holey silicon as an efficient thermoelectric material // Nano Lett. 2010. Vol. 10, N. 10. P. 4279–4283.

17. O'Farrell N., Houlton A., Horrocks B. R. Silicon nanoparticles: applications in cell biology and medicine // J. Nanomed. 2006. N. 1. P. 451–472.

18. Mc. Vey B. F. P., Prabakar S., Goodig J. J., Tilley R. D. Solution, synthesis, surface passivation, optical properties, biomedical applications, and cytotoxicity of silicon and germanium nanocrystals // Chem. Plus. Chem. 2017. Vol. 82. P. 60–73.

19. Dimitrakis P., Kapetanakis E., Tsoukalas D., Skarlatos D., Bonafos C., Ben Assayag G., Claverie A., Perego M., Fanciulli M., Soncini V., Sotgiu R., Agarwal A., Ameen M., Sohl C., Normand P. Silicon nanocrystal memory devices ob-

tained by ultra-low-energy ion-beam synthesis // Solid. State Electron. 2004. Vol. 48, N. 9. P. 1511–1517.

20. **Ossicini S., Pavesi L., Priolo F.** Light Emitting Silicon for Microphotonics, STMP. 194, Springer, Berlin, 2003.

21. **Ioria F., Degolib E., Luppia E., Magria R., Marrib I., Cantelec G., Ninnoc D., Tranic F., Ossicini S.** Doping in silicon nanocrystals: An ab initio study of the structural, electronic and optical properties // Journal of Luminescence. 2006. Vol. 121. P. 335–339.

22. **Hemaprabha E., Pandey U. K., Chattopadhyay K., Ramamurthya P. C.** Doped silicon nanoparticles for enhanced charge transportation in organic/inorganic hybrid solar cells // Solar Energy. 2018. Vol. 173. P. 744–751.

23. **Gresback R., Kramer N. J., Ding Y., Chen T., Kortshagen U. R., Nozaki T.** Controlled doping of silicon nanocrystals investigated by solution-processed field effect transistors // ACS Nano. 2014. Vol. 8, N. 6. P. 5650–5656.

24. **Bin Song, Yao He.** Fluorescent silicon nanomaterials: from synthesis to functionalization and application // Nano Today. 2019. Vol. 26. P. 149–163.

25. **Arduca E., Perego M.** Doping of silicon nanocrystals // Materials Science in Semiconductor Processing. 2017. Vol. 62. P. 156–170.

26. **Chen X., Pi X., Yang D.** Critical role of dopant location for P-doped Si nanocrystals // J. Phys. Chem. 2011. Vol. 115, N. 3. P. 661–666.

27. **Xu Q., Luo J. W., Li S. S., Xia J. B., Li J., Wei S. H.** Chemical trends of defect formation in Si quantum dots: the case of group-III and group-V dopants // Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys. 2007. Vol. 75, N. 23. P. 1–6.

28. **Pi X. D., Gresback R., Liptak R. W., Campbell S. A., Kortshagen U.** Doping efficiency, dopant location, and oxidation of Si nanocrystals // Appl. Phys. Lett., 2008. Vol. 92, N. 12. P. 23–25.

29. **Stegner A. R., Pereira R. N., Lechner R., Klein K., Wiggers H., Stutzmann M., Brandt M. S.** Doping efficiency in freestanding silicon nanocrystals from the gas phase: phosphorus incorporation and defect-induced compensation // Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys. 2009. Vol. 80, N. 16. P. 1–10.

30. **Gnaser H., Gutsch S., Wahl M., Schiller R., Kopnarski M., Hiller D., Zacharias M.** Phosphorus doping of Si nanocrystals embedded in silicon oxynitride determined by atom probe tomography // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115, N. 3. P. 034304-034304-7.

31. **Булярский С. В., Фистул В. И.** Термодинамика и кинетика взаимодействующих дефектов в полупроводниках. М.: Наука. 1997. 350 с.

32. **Bulyarskiy S. V., Kitsyuk E. P., Lakalin A. V., Pavlov A. A., Ryazanov R. M.** Carbon Solubility in a Nickel Catalyst with the Growth of Carbon Nanotubes // Russian Microelectronics. 2020. Vol. 49, N. 1 P. 25–29.

33. **Глазов В. М., Земсков В. С.** Физико-химические основы легирования полупроводников. М.: Наука, 1967. 371 с.

34. **Yang P., Gwilliam R. M., Crowe I. F., Papachristodoulou N., Halsall M. P., Hylton N. P., Hulko O., Knights A. P., Shah M., Kenyon A. J.** Size limit on the phosphorus doped silicon nanocrystals for dopant activation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2013. Vol. 307. P. 456–458.

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

Corresponding author:

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

Solubility of Impurities in Silicon Nanocrystals

Received on April 20, 2020

Accepted on May 18, 2020

The authors have developed a thermodynamics of the solubility of impurities in nanocrystals. The solubility is influenced by the surface energy of the nanocrystal, therefore, with a decrease in its size, the solubility of the impurity decreases, then becomes discrete in it, i.e. a countable number of atoms are dissolved only. In nanocrystals smaller than a certain size, the impurity cannot be dissolved. The calculations apply to silicon nanocrystals in the oxide of this material.

Keywords: nanocrystals, solubility of impurities, surface effect

For citation:

Bulyarskiy S. V., Svetukhin V. V. Solubility of Impurities in Silicon Nanocrystals, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 7, pp. 375–380.

DOI: 10.17587/nmst.22.375-380

References

1. **Silicon Photonics** / Eds. L. Pavesi, D. J. Lockwood. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004. 391 p.
2. **Marri I., Degoli E., Ossicini S.** Doped and codoped silicon nanocrystals: The role of surfaces and interfaces, *Progress in Surface Science*, 2017, vol. 92, no. 4, pp. 375–408.
3. **Talapin D. V., Lee J. S., Kovalenko M. V., Shevchenko E. V.** Prospects of colloidal nanocrystals for electronic and optoelectronic applications, *Chem. Rev.*, 2010, vol. 110, iss. 1, pp. 389–458.
4. **Gupta A., Khalil A. S. G., Offer M., Geller M., Winterer M., Lorke A., Wiggers H.** Synthesis and ink-jet printing of highly luminescing silicon nanoparticles for printable electronics, *Nanotechnology*, 2011, vol. 11, no. 6, pp. 5028–5033.
5. **Daldosso N., Pavesi L.** Nanosilicon photonics, *Laser Photon. Rev.*, 2009, vol. 3, no. 6, pp. 508–534.
6. **Bisadi Z., Mancinelli M., Manna S., Tondini S., Bernard M., Samusenko A., Ghulinyan M., Fontana G., Bettotti P., Ramiro-Manzano F., Pucker G., Pavesi L.** Silicon nanocrystals for nonlinear optics and secure communications, *Phys. Status Solidi A*, 2015, vol. 212, pp. 2659–2671.
7. **Priolo F., Gregorkiewicz F., Galli M., Krauss T. F.** Silicon nanostructures for photonics and photovoltaics, *Nat. Nanotechnol.*, 2014, vol. 9, no. 1, pp. 19–32.
8. **Nozik A. J.** Nanosciences and nanostructures for photovoltaics and solar fuels, *Nano Lett.*, 2010, vol. 10, no. 8, pp. 2735–2741.
9. **Conibeer G., Green M. A., König D., Perez-Würfl I., Huang S., Xiao X., Di D., Shi L., Shrestha S., Putheen-Veetil B., So Y., Zhang B., Wan Z.** Silicon quantum dots based solar cells: addressing the issue of doping, voltage and current transport, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 2011, vol. 19, pp. 813–824.
10. **Mangolini L.** Synthesis, properties, and applications of silicon nanocrystals, *J. Vac. Sci. Technol.*, B, 2013, vol. 31, no. 2, p. 020801.
11. **Löper P., Canino M., López-Vidrier J.** et al. Silicon nanocrystals from high-temperature annealing: characterization on device level, *Phys. Status Solidi A*, 2013, vol. 210, pp. 669–675.
12. **Summonte C., Allegranza M., Bellettato M.** et al. Silicon nanocrystals in carbide matrix, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2014, vol. 128, pp. 138–149.
13. **Priolo F., Gregorkiewicz T., Galli M., Krauss T. F.** Silicon nanostructures for photonics and photovoltaics, *Nat. Nanotechnol.*, 2014, vol. 9, no. 1, pp. 19–32.
14. **Dresselhaus M. S., Gang C., Ming Y. T.** et al. New directions for low-dimensional thermoelectric materials, *Adv. Mater.*, 2007, vol. 19, pp. 1043–1053.
15. **Claudio T., Stein N., Stroppa D. G., Klobes B.** et al. Nanocrystalline silicon: lattice dynamics and enhanced thermoelectric properties, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2014, vol. 16, pp. 25701–25709.
16. **Tang J., Wang H. T., Lee D. H.** et al. Holey silicon as an efficient thermoelectric material, *Nano Lett.*, 2010, vol. 10, no. 10, pp. 4279–4283.
17. **O'Farrell N., Houlton A., Horrocks B. R.** Silicon nanoparticles: applications in cell biology and medicine, *J. Nanomed.*, 2006, no. 1, pp. 451–472.
18. **Mc. Vey B. F. P., Prabakar S., Goodig J. J., Tilley R. D.** Solution, synthesis, surface passivation, optical properties, biomedical applications, and cytotoxicity of silicon and germanium nanocrystals, *Chem. Plus. Chem.*, 2017, vol. 82, pp. 60–73.
19. **Dimitrakis P., Kapetanakis E., Tsoukalas D., Skarlatos D., Bonafos C., Ben Assayag G., Claverie A., Perego M., Fanciulli M., Soncini V., Sotgiu R., Agarwal A., Ameen M., Sohl C., Normand P.** Silicon nanocrystal memory devices obtained by ultra-low-energy ion-beam synthesis, *Solid. State Electron.*, 2004, vol. 48, no. 9, pp. 1511–1517.
20. **Ossicini S., Pavesi L., Priolo F.** *Light Emitting Silicon for Microphotonics*, STMP 194, Springer, Berlin, 2003.
21. **Ioria F., Degolib E., Luppia E., Magria R., Marrib I., Cantelec G., Ninnoc D., Tranic F., Ossicini S.** Doping in silicon nanocrystals: An ab initio study of the structural, electronic and optical properties, *Journal of Luminescence*, 2006, vol. 121, pp. 335–339.
22. **Hemaprabha E., Pandey U. K., Chattopadhyay K., Ramamurthya P. C.** Doped silicon nanoparticles for enhanced charge transportation in organic/inorganic hybrid solar cells, *Solar Energy*, 2018, vol. 173, pp. 744–751.
23. **Gresback R., Kramer N. J., Ding Y., Chen T., Kortshagen U. R., Nozaki T.** Controlled doping of silicon nanocrystals investigated by solution-processed field effect transistors, *ACS Nano*, 2014, vol. 8, no. 6, pp. 5650–5656.
24. **Bin Song, Yao He.** Fluorescent silicon nanomaterials: from synthesis to functionalization and application, *Nano Today*, 2019, vol. 26, pp. 149–163.
25. **Arduca E., Perego M.** Doping of silicon nanocrystals, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2017, vol. 62, P. 156–170.
26. **Chen X., Pi X., Yang D.** Critical role of dopant location for P-doped Si nanocrystals, *J. Phys. Chem.*, 2011, vol. 115, no. 3, pp. 661–666.
27. **Xu Q., Luo J. W., Li S. S., Xia J. B., Li J., Wei S. H.** Chemical trends of defect formation in Si quantum dots: the case of group-III and group-V dopants, *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.*, 2007, vol. 75, no. 23, pp. 1–6.
28. **Pi X. D., Gresback R., Liptak R. W., Campbell S. A., Kortshagen U.** Doping efficiency, dopant location, and oxidation of Si nanocrystals, *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 92, no. 12, pp. 23–25.
29. **Stegner A. R., Pereira R. N., Lechner R., Klein K., Wiggers H., Stutzmann M., Brandt M. S.** Doping efficiency in freestanding silicon nanocrystals from the gas phase: phosphorus incorporation and defect-induced compensation, *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.*, 2009, vol. 80, no. 16, pp. 1–10.
30. **Gnaser H., Gutsch S., Wahl M., Schiller R., Kopnarski M., Hiller D., Zacharias M.** Phosphorus doping of Si nanocrystals embedded in silicon oxynitride determined by atom probe tomography, *J. Appl. Phys.*, 2014, vol. 115, no. 3, pp. 034304-034304-7.
31. **Bulyarskiy S. V., Fistul V. I.** *Thermodynamics and kinetics of interacting defects in semiconductors*, Moscow, Nauka, 1997, 351 p. (in Russian).
32. **Bulyarskiy S. V., Kitsyuk E. P., Lakalin A. V., Pavlov A. A., Ryazanov R. M.** Carbon Solubility in a Nickel Catalyst with the Growth of Carbon Nanotubes, *Russian Microelectronics*, 2020, vol. 49, no. 1, pp. 25–29.
33. **Glazov V. M., Zemskov V. S.** *Physicochemical principles of doping of semiconductors*, Moscow, Nauka, 1967, 371 p. (in Russian).
34. **Yang P., Gwilliam R. M., Crowe I. F., Papachristodoulou N., Halsall M. P., Hylton N. P., Hulko O., Knights A. P., Shah M., Kenyon A. J.** Size limit on the phosphorus doped silicon nanocrystals for dopant activation, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2013, vol. 307, pp. 456–458.

Ю. В. Рубцов, генеральный директор АО "ЦКБ "Дейтон", г. Москва, Зеленоград, зам. зав. каф. НИУ МИЭТ, г. Москва, e-mail: Rubtsov@Deyton.ru,
Д. А. Дормидошина, зам. генерального директора АО "ЦКБ "Дейтон", г. Москва, Зеленоград, доц. каф., НИУ МИЭТ, г. Москва, Зеленоград, e-mail: Dormidoshina@Deyton.ru,
М. Л. Савин, науч. сотр. каф., НИУ МИЭТ, г. Москва, Зеленоград, e-mail: Savin@Deyton.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ СБОРА, АНАЛИЗА И ОБОБЩЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ВЫВОДНЫХ РАМКАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ИЗДЕЛИЯХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Поступила в редакцию 08.05.2020

Объем функций, выполняемый электронной компонентной базой (ЭКБ), растет, повышаются требования к параметрам и показателям качества, к уменьшению габаритных и технологических размеров. Доля изделий нано- и микросистемной техники в ЭКБ растет. Без полного понимания и точного выполнения требований документов по стандартизации и проведения унификации усложняется задача применения в ЭКБ элементов и компонентов, в том числе выводных рамок. В целях обеспечения качества и надежности ЭКБ, совершенствования процессов разработки и изготовления проведены исследования, результаты которых представлены в настоящей статье.

Ключевые слова: микросхема, приборы полупроводниковые, выводная рамка, база электронная компонентная (ЭКБ), качество, надежность, стандартизация, унификация

Введение

Выводная рамка электронной компонентной базы (ЭКБ) в национальных документах по стандартизации определена как деталь, представляющая собой в состоянии поставки ряд или ряды выводов, соединенных общей перемычкой. Разновидностью выводной рамки является изолирующая рамка — сборочная единица, представляющая собой выводную рамку с припаянными к ее внешней части керамическими пластинами (с участками металлизации под пайку выводов), препятствующими возможному изменению формы выводов и их расположению при тестировании и транспортировании. Рамки применяются в корпусах ЭКБ и являются деталью, определяющей основные ее параметры.

Стандартизация выводных рамок

В электротехническом словаре 521-05-32 (Полупроводниковые приборы и интегральные схемы) Международной электротехнической комиссии (МЭК) выводная рамка определена как металлическая основа, обеспечивающая механическую опору для крепления выводов.

Национальные документы по стандартизации, регламентирующие разработку документации и порядок применения выводных рамок:

ОСТ 11 0694—89. Микросхемы интегральные. Корпуса. Общие технические условия. Требования данного отраслевого стандарта действуют на ЭКБ общехозяйственного назначения и ЭКБ категории качества "ВП", на которую не распространяется ГОСТ РВ 5901-004—2010;

ОСТ 11 0304—93. Приборы полупроводниковые. Корпуса. Общие технические условия. Распространение аналогично ОСТ 11 0694—89;

ГОСТ РВ 5901-004—2010. Изделия электронной техники военного назначения. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Корпуса. Общие технические условия;

ОСТ 11 0844—91. Микросхемы интегральные. Перечень габаритных чертежей;

ГОСТ 29137—91. Формовка выводов и установка изделий электронной техники на печатные платы. Общие требования и нормы конструирования. Стандарт содержит варианты и требования к формовке выводов и установке ЭКБ;

ГОСТ Р 57439—2017. Приборы полупроводниковые. Основные размеры. Распространяется на приборы полупроводниковые в корпусах и устанавливает их основные габаритные, присоединительные и установочные размеры;

ГОСТ Р 54844—2011. Микросхемы интегральные. Основные размеры. Распространяется на интегральные микросхемы, микросборки, многокристальные модули в корпусах и устанавливает их основные габаритные, присоединительные и установочные размеры;

ГОСТ Р 50044—2009. Изделия электронной техники для поверхностного монтажа радиоэлектронной аппаратуры. Требования к конструктивной совместимости. Распространяется на ЭКБ в корпусах, предназначенную для монтажа на поверхность печатных плат радиоэлектронной аппаратуры, и устанавливает требования, обеспечивающие конструктивную совместимость ее частей;

ГОСТ Р МЭК 60194-2—2019. Платы печатные. Проектирование, изготовление и монтаж. Термины и определения. Часть 2. Стандартное употребление в электронной технике, а также для печатных плат и техники электронного монтажа. Идентичен международному стандарту IEC 60194-2:2017 "Printed boards — Design, manufacture and assembly — Vocabulary — Part 2: Common usage in electronic technologies as well as printed board and electronic assembly technologies". Устанавливает термины и определения понятий в области печатных плат, проектирования, изготовления и технологии электронного монтажа;

ГОСТ Р МЭК 61191-1—2017. Печатные узлы. Часть 1. Поверхностный монтаж и связанные с ним технологии. Общие технические требования. Идентичен международному стандарту IEC 61191-1:2013 "Printed board assemblies — Part 1:

Generic specification — Requirements for soldered electric and electronic assemblies using surface mount and related assembly technologies". Устанавливает требования к материалам, методам и критериям контроля для производства качественных межсоединений и печатных узлов с применением технологии поверхностного монтажа и связанных с ней технологий сборки. В настоящий стандарт включены также рекомендации для качественных производственных процессов;

ГОСТ Р МЭК 61191-2—2017. Печатные узлы. Часть 2. Поверхностный монтаж. Технические требования. Идентичен международному стандарту МЭК IEC 61191-2:2013 "Printed board assemblies — Part 2: Sectional specification — Requirements for surface mount soldered assemblies" Устанавливает требования к паяным соединениям поверхностного монтажа;

ГОСТ Р МЭК 61191-3—2010. Печатные узлы. Часть 3. Монтаж в сквозные отверстия. Технические требования. Идентичен международному стандарту IEC 61191-3:1998 Printed board assemblies — Part 3: Sectional specification — Requirements for through-hole mount soldered assemblies. Устанавливает требования к паяным соединениям выводов ЭКБ в отверстия. Требования распространяются на печатные узлы, которые полностью содержат ЭКБ с выводами и устанавливаются в отверстия, собираются по технологии пайки в сквозные отверстия или на печатные узлы, содержащие области с пайкой выводов в отверстия, а также области, собираемые другими сопутствующими технологиями;

ГОСТ Р МЭК 61188-5-1—2012. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5-1. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). Общие требования. Идентичен международному стандарту IEC 61188-5-1:2002 "Printed boards and printed board assemblies — Design and use — Part 5-1: Attachment (land/joint) considerations — Generic requirements". Предоставляет информацию о геометрии посадочных мест, используемых для поверхностного монтажа ЭКБ.

Документы МЭК по стандартизации выводовных рамок:

IEC 62258-1—2009. Semiconductor die products — Part 1: Procurement and use. (Полупроводниковые штампованные изделия. Часть 1. Поставка и применение). Стандарт определяет минимальные требования к данным, необходимым для описания рамок, в том числе: область

применения; свойства; информация об испытаниях, качестве, сборке и надежности;

IEC 61967-1—2018. Integrated circuits — Measurement of electromagnetic emissions. Part 1: General conditions and definitions. Схемы интегральные. (Измерение электромагнитного излучения. Часть 1. Общие условия и определения). Содержит информацию по измерению проводимых и излучаемых электромагнитных помех от интегральных схем, а также описание условий измерений, испытательного оборудования и установок, процедур испытаний и содержания протоколов испытаний. В приложение к стандарту включена таблица сравнения методов испытаний, обеспечивающая выбор соответствующего метода;

IEC 60194—2015. Printed board design, manufacture and assembly — Terms and definitions. (Проектирование, изготовление и монтаж печатных плат. Термины и определения). Стандарт определяет терминологию, используемую в области печатных плат и ЭКБ.

Знание перечисленных выше стандартов и их выполнение при разработке выводных рамок обеспечивает соблюдение:

- 1) норм проектирования, правил классификации и единства терминологии, методов расчета, правил оформления конструкторских документов;
- 2) параметров производственного процесса и мощностей, отработанного технологического процесса;
- 3) требований к конструкции, основным параметрам, присоединительным и габаритным размерам;
- 4) условий эксплуатации, технических требований.

В результате чего достигается соответствующее качество ЭКБ; достаточная надежность; расширение диапазона применения.

Унификация выводных рамок

Одним из важнейших показателей выводных рамок является трудоемкость производства и себестоимость, что в современных условиях стремительного роста номенклатуры ЭКБ обеспечивается применением типовых конструкторских решений, которые базируются на унификации компонентов и элементов ЭКБ.

Унификация выводных рамок — это сокращение необоснованного многообразия типов и

конструкций, форм и размеров, заготовок, профилей и марок материалов. Унификация осуществляется на стадиях проектирования ЭКБ — разработки принципиальных конструктивных решений.

Унификация основывается на агрегатировании и конструкционной преемственности — применении в конструкции нового изделия уже освоенных в производстве элементов и компонентов. Это позволяет использовать существующий на предприятии инструментарий, отработанные технологии производства и, как следствие, существенно сократить сроки и стоимость технологической подготовки и освоения производства.

Обеспечивающим фактором унификации является наличие следующей информации о применяемых выводных рамках: основные параметры, присоединительные и габаритные размеры; уровни качества и условия эксплуатации; материалы, характеристики, технические требования, методы испытаний, дефекты в выводных рамках, приводящие к отказам ЭКБ; нормы проектирования, правила классификации и единства терминологии; методы расчетов, правила оформления конструкторских документов.

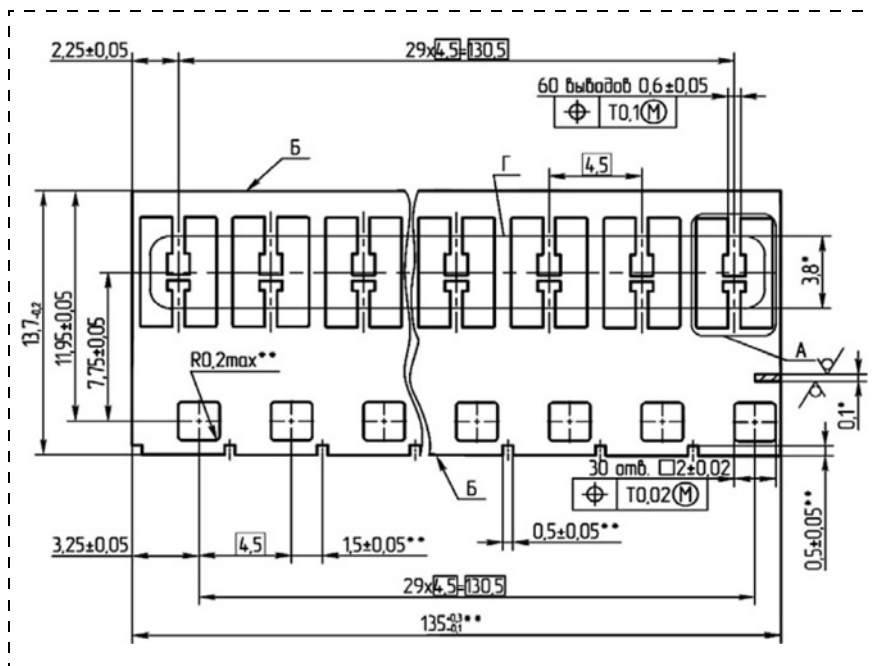
Цифровизация информации о выводных рамках

Источником информации для проведения унификации выводных рамок является разработанный в АО "ЦКБ "Дейтон" "Каталог выводных рамок для микросхем интегральных и приборов полупроводниковых".

Каталог создан путем сбора информации о разработках, изготовлении и применении выводных рамок организациями радиоэлектронной промышленности; оценки ее достоверности, полноты и своевременности; приведения ее к виду, обеспечивающему обработку данных электронными средствами.

На этапе анализа собранной информации особое место занимали формы и методы ее исследования:

- выявление причинно-следственных связей между значениями определенных косвенных параметров выводных рамок;
- оценка влияния номенклатуры параметров выводных рамок на структуру каталога;
- классификация, осуществляемая путем поиска критериев, по которым можно было бы от-



Пример электронного чертежа выводной рамки, размещенного в Каталоге

носить выводные рамки к определенному классу, виду и категории;

- группирование выводных рамок по различным признакам.

Каталог выводных рамок содержит следующую информацию:

- число кадров в рамке;
- число выводов в кадре;
- ширина, толщина или диаметр, шаг позиции выводов;
- длина и ширина выводной рамки;
- размеры монтажной площадки;
- материалы выводной рамки и покрытия (стандарт или другой документ разработки, изготовления и поставки).

В качестве основного материала в рамках, включенных в Каталог, используется лента из прецизионных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения, с улучшенным качеством поверхности.

Таблица

Число выводов	Число рамок
2...8	104
9...16	9
17...32	15
33...64	5
65...128	12
129...256	20
257...512	4

Каталог содержит чертежи выводных рамок, в том числе в электронном виде, с указанием габаритных и присоединительных размеров. Пример представлен на рисунке.

Анализ электронных чертежей в Каталоге показывает их исполнение в соответствии с требованиями комплекса национальных стандартов, устанавливающих взаимосвязанные правила, требования и нормы по разработке, оформлению и обращению конструкторской документации, разрабатываемой и применяемой на всех стадиях жизненного цикла изделия — ЕСКД — единых оптимальных правил, требований и норм выполнения, оформления и обращения конструкторской доку-

ментации, которые обеспечивают: взаимообмен конструкторской документацией, необходимую комплектность, качество разработок.

В каталоге содержатся данные по 180 выводным рамкам, которые по числу выводов распределяются согласно таблице.

Анализ выводных рамок по числу выводов показывает необходимость в унификации мало-выгодных рамок.

Каталог представлен на бумажных носителях и в электронном виде, в on-line-доступе на сайте АО "ЦКБ "Дейтон" <http://www.deyton.ru>. В on-line-доступе Каталог обеспечен поисковым инструментом, разработанным языковыми средствами системы управления реляционными базами данных MySQL и скриптового языка, применяемого для разработки веб-приложений — PHP.

Заключение

В ходе исследования были изучены требования документов по стандартизации выводных рамок, также их свойства и параметры в целях унификации и стандартизации с помощью Каталога выводных рамок и программного инструментария к нему. Исследования показали необходимость унификации маловыгодных рамок и использования стандартов МЭК для их применения.

Список литературы

1. **Стратегия** развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/1QkfNDghANiBUNBbXaFBM69Jxd48ePeY.pdf> (дата обращения: 03.03.2020).

2. **Информационная** поисковая система "Дейтрон". URL: <http://www.deyton.ru/4/ramky.php> (дата обращения: 03.03.2020).

3. **ГОСТ 2.001—2013**. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие положения. М.: Стандартиформ, 2018. С. 4—8.

4. **International** Electrotechnical Commission (IEC). Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary. URL: <http://www.electropedia.org/?ref=extfooter> (дата обращения: 03.03.2020).

Yu. V. Rubtsov, General Director of Central Design Office "Deyton", Head of Chair, Rubtsov@Deyton.ru,

D. A. Dormidoshina, Deputy General Director of Central Design Office "Deyton", Dormidoshina@Deyton.ru,

M. L. Savin, Researcher of National Research University of Electronic Technology, Savin@Deyton.ru, Moscow, Russian Federation

Corresponding author:

Dormidoshina Daria A., Deputy General Director of Central Design Office "Deyton", Moscow, Zelenograd, 124460, Russian Federation, e-mail: Dormidoshina@deyton.ru

Research and the Results of the Collection, Analysis and Summarize of Information on the Lead Frame Used in Microelectronics Products

Received on May 8, 2020

Accepted on June 10, 2020

The scope of functions, performed by the ECB is growing, requirements for parameters and quality indicators are increasing, and overall and technological dimensions are being reduced. The share of products of nano- and microsystem technology in ECB is growing. Without a complete understanding and exact fulfillment of the requirements of standardization documents and implementation of unification, the use of elements and components in the ECB including lead frames is complicated. In the course of the study were explore the requirements documents of standardizing for lead frames, their properties and parameters with the aim of their unification and standardization. Studies have been conducted in order to ensure the quality and reliability of ECB and to improve the development and manufacturing processes, the results of which are presented in this article

Keywords: chip, semiconductor, electronic component base (ECB), lead frame, quality, reliability, standardization, unification

For citation:

Rubtsov Yu. V., Dormidoshina D. A., Savin M. L. Research and the Results of the Collection, Analysis and Summarize of Information on the Lead Frame Used in Microelectronics Products, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 7, pp. 381—385.

DOI: 10.17587/nmst.22.381-385

References

1. **The development** strategy of the electronic industry of the Russian Federation for the period until 2030, available at: <http://static.government.ru/media/files/1QkfNDghANiBUNBbXaFBM69Jxd48ePeY.pdf> (date of access 03.03.2020).

2. **Search System** "Deyton", available at: <http://www.deyton.ru/4/ramky.php> (date of the access 03.03.2020).

3. **GOST 2.001—2013** Unified system for design documentation. General principles. Moscow: Standardinform, 2018, pp. 4—8.

4. **International** Electrotechnical Commission (IEC). Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary, available at: <http://www.electropedia.org/?ref=extfooter> (date of access 03.03.2020).

П. С. Гуляева, студент, С. В. Сидорова, канд. техн. наук, sidorova@bmstu.ru,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, г. Москва

РЕЗИСТИВНАЯ ПАМЯТЬ: ОСОБЕННОСТИ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВНЕДРЕНИЕМ ЛАБИРИНТНЫХ ПЛЕНОК

Поступила в редакцию 16.06.2020

Выполнен обзор работ по тематике и рассмотрены виды резистивной энергонезависимой памяти произвольного доступа. Описаны механизм резистивного переключения в ячейке резистивной памяти; операции, осуществляемые над ячейкой; технология производства массива ячеек резистивной памяти. Рассмотрен механизм переключения электропроводности лабиринтных пленок. Предложено внедрить лабиринтные пленки в ячейки резистивной памяти на основе токопроводящих наномостиков для улучшения характеристик устройства.

Ключевые слова: резистивная память, филамент, резистивное переключение, лабиринтные пленки, островковые пленки, электропроводность, запись, стирание

Введение

В настоящее время технологии стремительно интегрируются в жизнь людей. Цифровые приборы собирают и хранят большое количество данных, увеличивающееся с каждым днем. Во время развития и совершенствования технических устройств четко обозначаются тенденции к уменьшению размеров, увеличению производительности и объема запоминающих устройств (памяти). В связи с данными требованиями разрабатывают новые нанoeлектронные запоминающие устройства, в которых важно не только предельно миниатюризировать бит информации, но и сделать его энергонезависимым. Прогрессивной областью энергонезависимой памяти произвольного доступа является резистивная память.

Интерес научного сообщества к созданию и модернизации технологии резистивной энергонезависимой памяти растет с каждым годом (рис. 1). Следует отметить, что русскоязычных статей по данной тематике насчитывается несколько десятков, тогда как зарубежные базы данных публикаций наполнены тысячами и десятками тысяч работ о резистивной памяти. Приведенная на рис. 1 зависимость построена по данным поисковых запросов "resistive memory" и "nonvolatile memory" на сайтах баз данных статей и патентов.

Данная работа посвящена обзору современных разработок как российских, так и зарубежных ученых в области создания энергонезависимой

мой резистивной памяти. Авторами предложено внедрение в структуру резистивной памяти лабиринтных пленок, которые представляют собой несплошную пленку на этапе формирования каналов. Лабиринтные пленки — это островковые тонкие пленки с островками относительно большого размера червеобразной формы и системой каналов между ними (рис. 2) [1].

Интерес научного сообщества к тематике лабиринтных пленок возрастает (рис. 3), обнаруживаются новые свойства таких пленок как электропроводящие, так и оптические [1—4].

Приведенная на рис. 3 зависимость построена по данным поисковых запросов "Discontinuous

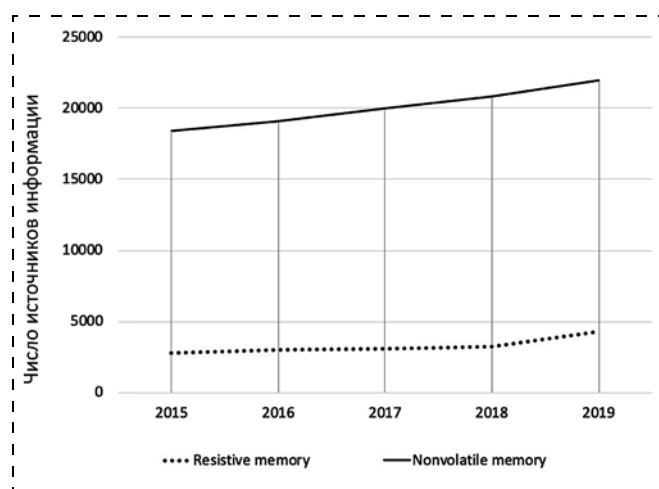


Рис. 1. График развития интереса научного сообщества к тематике резистивной энергонезависимой памяти за последние 5 лет

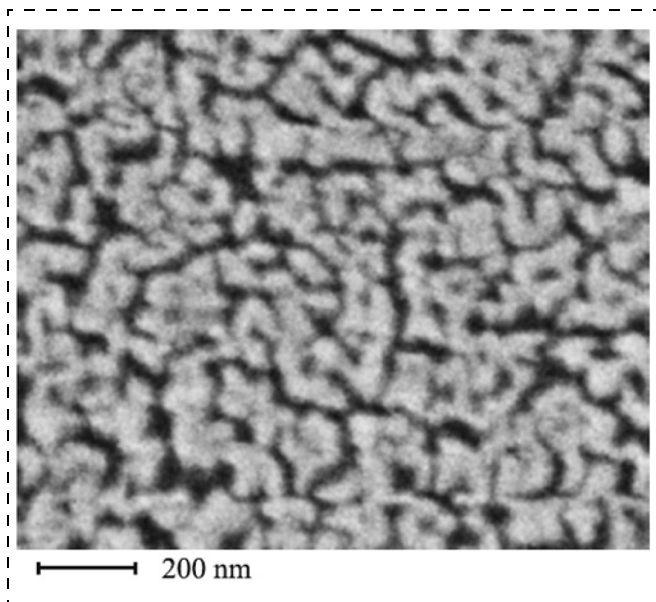


Рис. 2. Лабиринтная пленка [1]

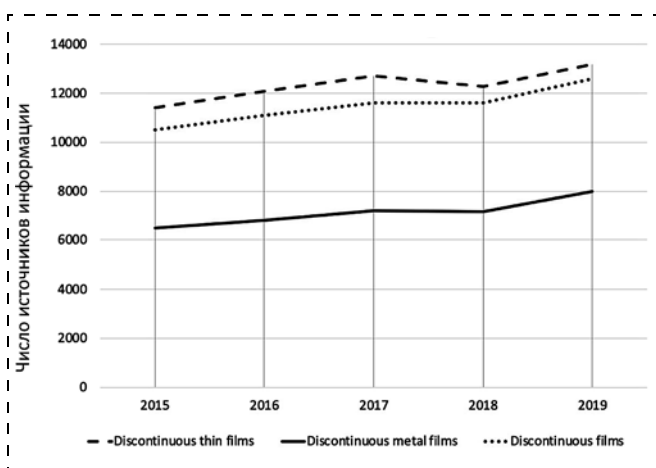


Рис. 3. График развития интереса научного сообщества к тематике несплошных (лабиринтных) пленок за последние 5 лет

thin films", "Discontinuous metal films" и "Discontinuous films" на сайтах баз данных статей и патентов.

Особенности и принцип действия резистивной памяти

Резистивная память — это энергонезависимая память произвольного доступа, запись данных которой связана с переходом ячейки из высокоомного в низкоомное состояние и наоборот, благодаря образованию и распаду филаментов (нитевидных образований) в диэлектрическом слое между двумя электродами при подаче напряжения определенного значения и направле-

ния. Энергонезависимая память не нуждается в постоянном подключении к электросети: записанные данные сохраняются и при отсутствии подачи электроэнергии.

Под произвольным доступом к ячейке памяти понимается возможность обращения к любой ячейке за равный промежуток времени вне зависимости от ее расположения в массиве. Поддержка произвольного доступа структурой данных является критичной для многих алгоритмов, например для поиска. Переключение сопротивления ячеек резистивной памяти делится на моно- и биполярное. При однополярном переключении операции записи, стирания и чтения проводятся при подаче напряжения одного знака. При биполярном переключении управление процессами происходит за счет смены знака подаваемого напряжения. Биполярное переключение является более выгодным, так как требует меньших расходов энергии: подаваемое напряжение ниже на порядок.

Резистивная память делится на оксидную память и память с токопроводящими наномостиками [5–7]. Ячейка резистивной памяти состоит из двух электродов, между которыми располагается диэлектрик [7]. При подаче на электроды разности потенциалов заданного значения и направления происходит формирование или разрушение проводящего канала — филамента. При формировании филамента в ячейке оксидной памяти происходит диффузия атомов кислорода, в диэлектрическом слое возникают токопроводящие линии. В качестве носителя заряда выступают вакансии кислорода.

В ячейке памяти на основе наномостиков филамент состоит из ионов металла, которые выстраиваются в мостик, по которому проходит ток. Проводящий канал любого типа резистивной памяти формируется по направлению напряженности электрического поля, которое возникает вследствие подачи разности потенциалов на электроды (рис. 4).

Резистивная память на основе токопроводящих наномостиков имеет ряд преимуществ [8]. По сравнению с оксидной она обеспечивает более длительное время хранения информации в ячейке. Также этот тип резистивной памяти использует более низкие электрические мощности, так как для программирования ячеек требуется более низкое напряжение. Проводимость оксидной памяти основана на дефектах, а памяти на основе мостиков — на металлических нитях, поэтому она более надежна.

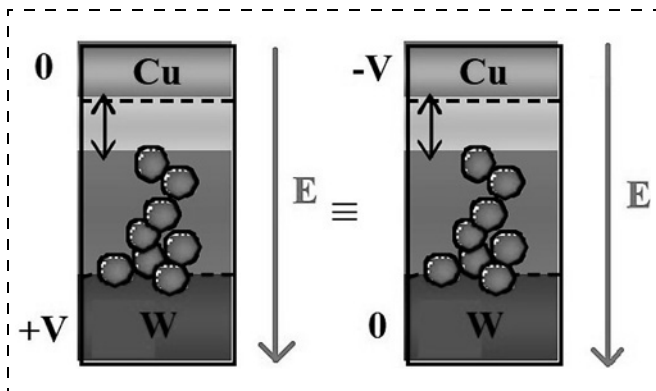


Рис. 4. Эквивалентные схемы процесса формирования филамента в ячейке резистивной памяти при подаче разности потенциалов на электроды [7]

Каждая из ячеек резистивной памяти на основе наномостиков записывает один бит данных. Ячейки памяти объединяют в массив, представленный на рис. 5. Ячейкой резистивной памяти является область вертикальный электрод-столбец — слой резистивного переключения — боковой плоский электрод [11]. Изначально все ячейки массива находятся в состоянии высокого сопротивления, так как в слое резистивного переключения нет филаментов. Чтобы выбрать желаемую ячейку памяти (прямоугольник в красной линии на рис. 5, см. вторую сторону обложки) необходимо подать фазу на соответствующий электрод-столбец и заземлить соответствующий боковой плоский электрод. Управление плоским электродом осуществляется через линию управления, соединяющую плоские электроды одного уровня металлизации (ступеньки). Возникающая разность потенциалов запускает процессы резистивного переключения. В зависимости от значения и направления напряжения проводятся формовка, запись и стирание, чтение бита данных. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) при записи (состояние низкого сопротивления), стирании (состояние высокого сопротивления) и чтении одного бита данных ячейки вертикальной резистивной памяти на основе наномостиков представлена на рис. 6 (см. вторую сторону обложки).

Для активации резистивного переключения ячейки резистивной памяти на электрод-столбец подается напряжение формовки [5], плоский боковой электрод заземлен. Напряжение формовки — это напряжение прямого направления, значение которого численно больше, чем напряжение записи. Формовка впервые переводит ячейку из высокорезистивного состояния в низ-

корезистивное и является процессом, запускающим дальнейшее резистивное переключение. Формовка ячейки памяти — это первичная операция. Она происходит единожды.

Для перевода желаемой ячейки в состояние низкого сопротивления на электрод-столбец подается напряжение прямого направления, электрохимически выстраивается токопроводящая нить из активного металла. В низкорезистивном состоянии ячейки памяти между электродами через филамент протекает электрический ток. Для перевода желаемой ячейки в состояние высокого сопротивления на тот же электрод-столбец подается напряжение обратного направления, созданная проводящая нить разрушается. Значение "0" соответствует состоянию низкого сопротивления, значение "1" — состоянию высокого сопротивления [7]. Многократная перезапись не влияет на свойства ячейки резистивной памяти.

Операция чтения проводится при более низком напряжении прямого направления, чтобы избежать изменения сопротивления ячейки [7]. Во время чтения в барьерном слое ячейки резистивной памяти на основе наномостиков строится тонкая нить из металла, которая самоуничтожается по снятии напряжения чтения. Ее спонтанное разрушение гарантирует уменьшение негативно влияющих токов утечки — электрических токов, протекающих по нежелательным проводящим путям в нормальных условиях эксплуатации и приводящих к ошибкам операций.

Сокращение токов утечки объясняется наличием тонкого непроводящего барьерного слоя, препятствующего полному смыканию металлической нити и электрода во время совершения операций над ячейкой резистивной памяти [9]. Это позволяет избавиться от необходимости установки переключателя около каждой ячейки резистивной памяти, т. е. делает ячейки резистивной памяти на основе наномостиков самопереключающимися.

Технология изготовления массива резистивной памяти

При реализации процесса изготовления многоуровневого массива ячеек вертикальной резистивной памяти на основе наномостиков (рис. 7) предпочтение отдано вертикальному типу стыковки слоев ячеек памяти, а не горизонтальному типу, так как горизонтальная структура характеризуется более сложными производственными

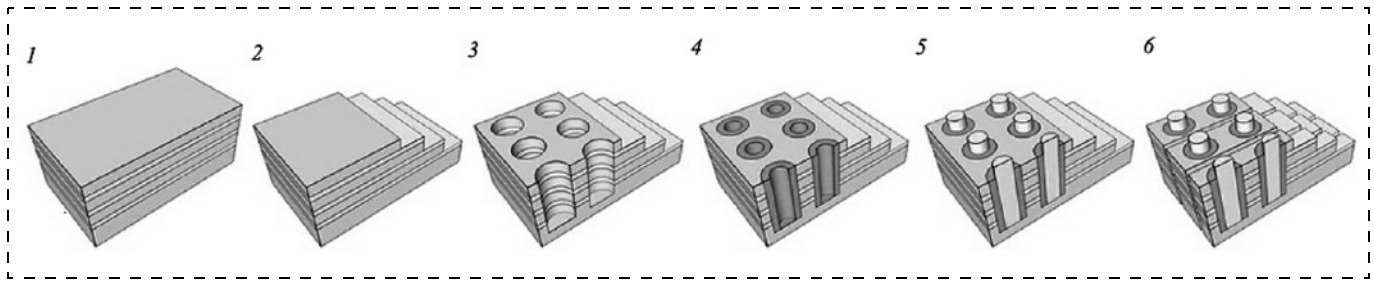


Рис. 7. Этапы процесса изготовления ячеек вертикальной резистивной памяти на основе наномостиков [10]

операциями и увеличением стоимости в условиях высокой плотности расположения [5].

Производство массива состоит из следующих основных этапов (этапы фотолитографии пропущены).

1. Попеременное осаждение слоев разделительного диэлектрика и плоских боковых электродов.

2. Травление плоских боковых электродов до ступенчатой структуры, чтобы затем подвести к ним линии управления.

3. Вытравливание несквозных отверстий.

4. Осаждение внутрь отверстий диэлектрика, осуществляющего резистивное переключение.

5. Осаждение вертикальных электродов-столбцов внутрь отверстий.

6. Разрезание плоских боковых электродов для разделения ячеек памяти.

Размер каждой из ячеек памяти — несколько десятков нанометров. Число ячеек резистивной памяти в чипе памяти — от 10^9 штук. Увеличение емкости памяти достигается путем увеличения числа слоев. Изображение двухслойного массива ячеек вертикальной резистивной памяти на основе наномостиков, полученного по данной технологии авторами работы [8], представлено на рис. 8.

Подложка, на которую наносят все слои ячеек резистивной памяти, состоит из Si/SiO₂. Межуровневым разделительным изолятором является SiO₂ [10]. Технология хорошо интегрируется в производство КМОП-микросхемы и чипов, так как базовый материал (кремниевая подложка) одинаков. Существующие способы монтажа кристаллов в корпус остаются актуальными по этой же причине.

В качестве заземляемого электрода используют химически неактивные высокоплотные металлы с высокой температурой плавления — W, Pt, Ta [8], реже — Ag, Au [2]. Данные свойства важны, поскольку электроды должны быть надежны, термически устойчивы, выдерживать

большое число циклов перезаписи, химически не взаимодействовать с соседними слоями.

Слой резистивного переключения формируется из диэлектриков — оксидов переходных металлов, или полупроводников — перовскитов. Используемые диэлектрики: Al₂O₃, NiO, Ta₂O₅, TiO₂, HfO₂, AlO₂, ZrO₂, ZnO [6].

Барьерный слой-переключатель изготавливают из аморфного кремния a-Si или поликремния poly-Si [9], потому что они обладают высокой нелинейностью: уменьшают значение проходящего в низком резистивном состоянии тока и минимизируют токи утечки.

Электрод, на который подается напряжение может быть из тех же материалов, что и заземленный электрод, или из Cu, Ti, Al, Ta, Zr, Ni. Второй вариант позволяет легче формировать проводящие нити, но уменьшает долговечность данного электрода.

Комбинация материалов слоистой структуры ячейки резистивной памяти зависит от адгезии

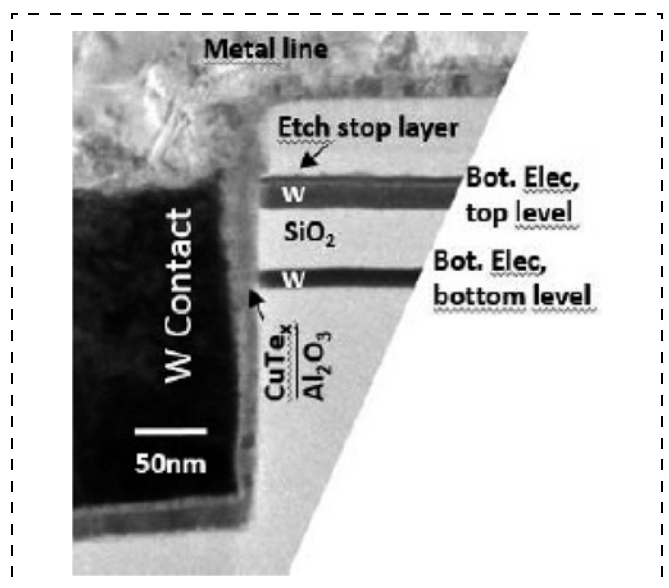


Рис. 8. Двухслойный массив вертикальной резистивной памяти на основе наномостиков [8]

прилегающих слоев друг к другу, от способов и режимов нанесения каждого из последовательно наносимых слоев.

Предложение по модернизации технологии изготовления

Улучшить характеристики ячеек резистивной памяти можно с помощью внедрения в межэлектродный диэлектрик лабиринтных пленок.

Электропроводностью лабиринтных пленок можно управлять путем подачи на них напряжения [3]. Лабиринтные тонкие пленки имеют два состояния проводимости: высокоомное и низкоомное. Они поддерживают моно- и биполярное переключение. Значения напряжений переключения совпадают с используемыми в операциях над ячейками вертикальной резистивной памяти на основе наномостиков. При подаче напряжения того же значения и направления, что и в ячейках памяти, можно менять сопротивление лабиринтных пленок [3]. Один слой лабиринтной пленки проявляет свойства переключения при толщине от 5 нм [2]. Переключение электропроводности лабиринтной пленки также энергонезависимо.

Предлагается внедрить в диэлектрик, отвечающий за резистивное включение, слой лабиринтной пленки металла (рис. 9) [6]. Интегрированные лабиринтные пленки — это проводящий металлический слой внутри диэлектрика, который появляется и исчезает в нужный момент: формируется дополнительный проводящий слой в

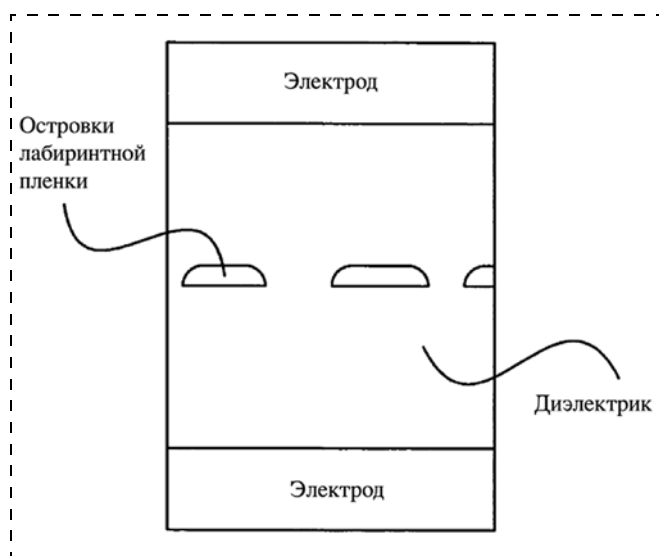


Рис. 9. Ячейка резистивной памяти с лабиринтной пленкой [6]

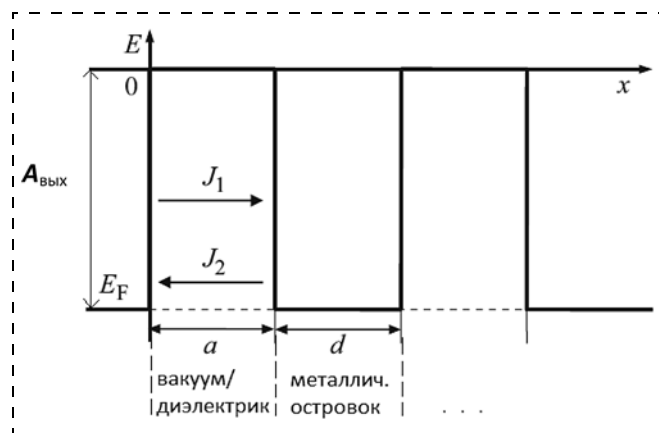


Рис. 10. Энергетическая диаграмма состояния электрона в nanoостровковой пленке [4]

низкоомной ячейке или разрушается в высокоомной.

Межэлектродный диэлектрик предполагается наносить не за одну операцию напыления, а поэтапно: диэлектрик, лабиринтная пленка, диэлектрик. Наличие лабиринтной пленки в диэлектрике увеличит скорость переключения и длительность удержания бита информации, уменьшит время отклика системы. Увеличение числа слоев лабиринтной пленки и размеров островков (уменьшение размеров каналов) в ней будут улучшать указанные характеристики.

Лабиринтные пленки формируют из проводящих металлов, например Cu, Al, Ag, Au. Предпочтительны островки из металла электрода, на который подается напряжение, если он не является химически неактивным, или из переходного металла, который входит в состав оксида диэлектрика. Лабиринтные пленки получают следующими методами: обработкой сплошной тонкой пленки лазером [3]; отжигом сплошной пленки [2]; своевременной остановкой напыления пленки при термическом испарении, магнетронном распылении; наносферной литографией [11] и др.

Эффект электронного переключения лабиринтной пленки обусловлен способностью сохранять возбужденную электрическим полем проводимость за счет наличия потенциальных барьеров вследствие макродефектов (каналов) [4]. В качестве описания потенциальных барьеров рассматривается модель металл—вакуум—металл (островок—канал—островок), которая отображает энергетическую диаграмму состояния в nanoостровковой пленке (рис. 10).

Данное состояние можно описать системой прямоугольных потенциальных ям (островки)

шириной d , разделенных прямоугольными потенциальными барьерами (каналы) [4]. Ширина барьера a соответствует длине прыжка электрона, высота барьера равна работе выхода $A_{\text{вых}}$ электрона из металлического островка. Чем меньше размер канала (больше размер островков), тем быстрее выполняется переключение. Электропроводность осуществляется одновременно по двум механизмам: тепловые перескоки через барьер и туннелирование через него. Электроны перемещаются с одного островка на другой, захватываясь вторым. Рост островков осуществляется за счет диффундируемых атомов и срачивания островков друг с другом. Чтобы токи J_1 и J_2 , протекающие через барьер, не были равны, необходимо поместить образец лабиринтной пленки во внешнее электрическое поле или подать на него напряжение. Наличие электрического поля приводит к смещению энергетических уровней и искажению формы барьера, т. е. вызывает направленный ток.

На примере моностабильного переключения рассмотрим вольт-амперную характеристику лабиринтной пленки с эффектом памяти (рис. 11) [12]. Наблюдаются резкие изменения сопротивления под действием напряжения, изменения обратимы. При подаче небольшого напряжения 5...8 В сопротивление пленки было 10^{12} Ом, при этом значение тока линейно зависит от напряжения (участок I). При дальнейшем увеличении напряжения пленка скачком переходит в проводящее состояние с сопротивлением $1,5 \cdot 10^5$ Ом (участок II). После этого сопротивление про-

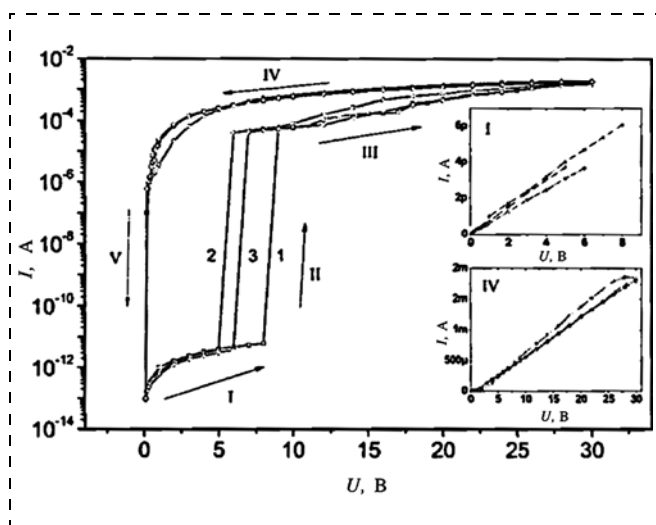


Рис. 11. ВАХ лабиринтной пленки серебра 5 нм. На вставках представлены ВАХ в линейном масштабе для участков I и IV [12]

должает падать с увеличением напряжения (участок III). При уменьшении напряжения ВАХ имеет практически линейную зависимость (участок IV), однако при напряжении около 0,1 В пленка переходит в исходное высокоомное состояние (участок V). Низкоомное и высокоомное состояния поддерживаются без постоянного питания. Этот эффект памяти связывают со структурными изменениями, производимыми электрическим действием в лабиринтных пленках (уменьшение высоты потенциального барьера при подаче на него напряжения прямого смещения). Возврат в высокоомное состояние пленок свидетельствует о малости данных структурных изменений. При биполярном переключении структура может быть возвращена в высокоомное состояние подачей порогового напряжения в обратном смещении (другого знака). Значение порога переключения зависит от исходного материала.

Заключение

Резистивное переключение в многослойных структурах с эффектом памяти — это перспективное направление при разработке энергонезависимой малопотребляющей резистивной памяти. Его можно применять в устройствах хранения, интернета вещей и нейроморфных системах ввиду малых рабочих токов. Механизм резистивного переключения ячейки памяти из высокоомного в низкоомное состояние и наоборот основывается на формировании и разрушении филамента из ионов металла, исходящих с электрода при подаче на него напряжения. Благодаря размеру ячейки резистивной памяти на основе наномостиков в несколько нанометров при том же размере чипа памяти на нем можно уместить большее число ячеек резистивной памяти, чем традиционных полевых транзисторов NAND-памяти с размерами в сотни нанометров [7].

Возможность управления локальной электропроводностью лабиринтных пленок путем создания и изменения в них мелких структур электрическим напряжением делает эти пленки подходящими для наноэлектронных устройств, в том числе для внедрения в ячейки резистивной памяти на основе токопроводящих наномостиков. Ожидается увеличение скорости совершения операций и долговечности хранения данных при интегрировании лабиринтных пленок в диэлектрический слой ячейки резистивной памяти.

Список литературы

1. **Вартанян Т. А., Гладских И. А., Леонов Н. Б.** и др. Тонкие структуры и переключение электропроводности в лабиринтных пленках серебра на сапфире // *Физика твердого тела*. 2014. Т. 56, Вып. 4. С. 783—789.
2. **Гущин М. Г., Гладских И. А., Вартанян Т. А.** Переключение состояний проводимости металлических лабиринтообразных пленок на пороге перколяции // *Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства*, Владимир—Суздаль. 2017. С. 128—132.
3. **Байдуллаева А., Борщ В. В., Велешук В. П.** и др. Структура Te—CdTe со свойством электронного переключения с памятью // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2007. № 5. С. 40—43.
4. **Томилин С. В., Бержанский В. Н., Милукова Е. Т.** и др. Особенности электрической проводимости наноструктурных металлических пленок // *Физика твердого тела*. 2018. Т. 60, Вып. 7. С. 1251—1259.
5. **Hong-Yu Chen, Stefano Brivio, Che-Chia Chang** et al. Resistive random access memory (RRAM) technology: From material, device, selector, 3D integration to bottom-up fabrication. 2017. DOI:10.1007/s10832-017-0095-9.
6. **Rinerson D., Chevallier C. J., Swab P. F. S.** et al. Memory element having islands, 2004, N US 2006/0028864.
7. **Lee F. M., Lin Y. Y., Lee M. H.** et al. A Novel Cross Point One-Resistor (0T1R) Conductive Bridge Random Access Memory (CBRAM) with Ultra Low Set/Reset Operation Current // *Digest of Technical Papers — Symposium on VLSI Technology*, 2012, DOI: 10.1109/VLSIT.2012.6242464.
8. **Piccolboni G., Parise M., Molas G.** et al. Vertical CBRAM (V-CBRAM): from experimental data to design perspectives // *IEEE 8th International Memory Workshop (IMW)*. 2016. DOI: 10.1109/IMW.2016.7495296.
9. **Jiantao Zhou, Fuxi Cai, Qiwen Wang** et al. Very Low Programming-Current RRAM with Self-Rectifying Characteristics // *IEEE Electron Device Letters*, 37 (4): 1-1, 2015, DOI: 10.1109/LED.2016.2530942.
10. **Yue Bai, Huaqiang Wu, Riga Wu** et al. Study of Multi-level Characteristics for 3D Vertical Resistive Switching Memory // *Scientific Reports* 4:5780. 2014. DOI: 10.1038/srep05780.
11. **Сидорова С. В.** Методы формирования тонких пленок: начальная стадия формирования // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. 2011. № 9. С. 13—17.
12. **Гладских И. А.** Оптические и фотоэлектрические свойства самоорганизованных плазмонных наноструктур. Автореф. дис. ... канд. техн. наук, 2014. 19 с.

P. S. Gulyaeva, Student, **S. V. Sidorova**, Ph. D., Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 101005, Russian Federation

Corresponding author:

Sidorova Svetlana V., Ph. D., Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 101005, Russian Federation, e-mail: sidorova@bmstu.ru, sidorova_bmstu@mail.ru

Resistive Memory: Features, Operating Principle and Modernization of Technology by Labyrinth Films Implantation

Received on June 16, 2020

Accepted on June 22, 2020

Different types of resistive non-volatile random access memory are presented. Operating principle of resistive switching in a resistive memory cell, operations performed in the cell and technology for producing an array of resistive memory cells are described. Operating principle of electrical conductivity switching of labyrinth films is explained. Guided by this principle, it is proposed to implement the labyrinth film in the resistive memory cell based on conductive nanobridges to improve memory performance.

Keywords: resistive memory, filament, resistive switching, labyrinth films, insular films, electrical conductivity, write, erase

For citation:

Gulyaeva P. S., Sidorova S. V. Resistive Memory: Features, Operating Principle and Modernization of Technology by Labyrinth Films Implantation, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 7, pp. 386—393.

DOI: 10.17587/nmst.22.386-393

References

1. **Vartanyan T. A., Gladskikh I. A., Leonov N. B.** et al. Tonkie struktury i pereklyuchenie elektroprovodnosti v labirintnykh plenках serebra na sapfire, *Fizika tverdogo tela*, 2014, T. 56, V. 4, p. 783—789 (in Russian).
2. **Gushchin M. G., Gladskih I. A., Vartanyan T. A.** Pereklyuchenie sostoyaniy provodimosti metallicheskih labirintoobraznykh plynok na poroge perkolyacii, *Sovremennyye nanotekhnologii i nanofotonika dlya nauki i proizvodstva*, Vladimir—Suzdal', 2017, pp. 128—132 (in Russian).

3. **Bajdullaeva A., Borshch V. V., Veleshchuk V. P.** et al. Структура Te — CdTe со свойством электронного переклю-
чения с памятью, *Tekhnologiya i konstruirovaniye v ele-
ktronnoj apparature*, 2007, no. 5, pp. 40—43 (in Russian).

4. **Tomilin S. V., Berzhanskij V. N., Milyukova E. T.** et al. Особенности электрической проводимости nanoostrovk-
ovyh metallicheskikh plenok, *Fizika tverdogo tela*, 2018, T. 60,
V. 7, pp. 1251—1259 (in Russian).

5. **Hong-Yu Chen, Stefano Brivio, Che-Chia Chang** et al. Resistive random access memory (RRAM) technology: from
material, device, selector, 3D integration to bottom-up fab-
rication, 2017, DOI: 10.1007/s10832-017-0095-9.

6. **Darrell Rinerson, Christophe J. Chevallier, Philip F. S. Swab** et al. Memory element having islands, 2004, no. US
2006/0028864.

7. **Lee F. M., Lin Y. Y., Lee M. H.** et al. A Novel Cross
Point One-Resistor (0T1R) Conductive Bridge Random Ac-
cess Memory (CBRAM) with Ultra Low Set/Reset Operation

Current, *Digest of Technical Papers — Symposium on VLSI
Technology*, 2012, DOI: 10.1109/VLSIT.2012.6242464

8. **Piccolboni G., Parise M., Molas G.** et al. Vertical
CBRAM (V-CBRAM): from experimental data to design per-
spectives, *IEEE 8th International Memory Workshop (IMW)*,
2016, DOI: 10.1109/IMW.2016.7495296.

9. **Jiantao Zhou, Fuxi Cai, Qiwen Wang** et al. Very Low
Programming-Current RRAM with Self-Rectifying Charac-
teristics, *IEEE Electron Device Letters*, 37 (4): 1-1, 2015,
DOI: 10.1109/LED.2016.2530942.

10. **Yue Bai, Huaqiang Wu, Riga Wu** et al. Study of Multi-
level Characteristics for 3D Vertical Resistive Switching Mem-
ory, *Scientific Reports* 4:5780, 2014, DOI: 10.1038/srep05780.

11. **Sidorova S. V.** Metody formirovaniya tonkih plenok:
nachal'naya stadiya formirovaniya, *Spravochnik. Inzhenernyj
zhurnal s prilozheniem*, 2011, no. 9, pp. 13—17 (in Russian).

12. **Gladskih I. A.** Opticheskie i fotoelektricheskie svojstva
samoorganizovannykh plazmonnykh nanostruktur, *Avtoref.
diss. ... kand. tekhn. nauk*, 2014. 19 p. (in Russian).

УДК 621.382

DOI: 10.17587/nmst.22.393-400

Б. Г. Путинцев, аспирант, e-mail: bogdanputintsev@yahoo.com,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук

ОБЗОР ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ МИС ДИАПАЗОНА 60 ГГц

Поступила в редакцию 08.06.2020

Представлен обзор приемопередающих монолитных интегральных схем (МИС) диапазона 60 ГГц. В первой части рассматриваются приемные и передающие системы на кристалле для высокоскоростной передачи данных, во второй части рассмотрены приемные и передающие системы на кристалле с интегрированными антеннами.

Ключевые слова: V-диапазон, приемопередающий модуль МИС, система на кристалле

Введение

Диапазон 60 ГГц (длина волны около 5 мм) активно осваивают разработчики и производители радиоэлектронных систем. Во многих юрисдикциях данный диапазон признан безлицензионным. Высокая степень поглощения в атмосфере позволяет выстраивать на его основе помехозащищенные беспроводные локальные и персональные сети [1]. В частности, приняты стандарты ISO/IEC 13156 (2011), IEEE 802.15.3c (2009) и IEEE 802.11ad (2013), в текущем году ожидается публикация стандарта IEEE 802.11ay. Благодаря использованию очень широкого спектра (2,16 ГГц) в стандарте IEEE 802.11ad на физическом уровне достигаются мультигигабитные скорости передачи данных (до 6,756 Гбит/с) с

простыми схемами модуляции, такими как BPSK и QPSK. Его расширение 802.11ay объединяет четыре канала в один шириной 8,64 ГГц, что с использованием MIMO и более сложных схем модуляции (возможно, до 256-QAM) позволит достигнуть скорости более 100 Гбит/с.

Приемопередающие системы на кристалле диапазона 60 ГГц

Система связи миллиметрового диапазона, в общем случае передатчик и приемник, содержит СВЧ схему и цифровую часть (рис. 1) [2].

Возможны варианты с формированием в генераторе сигнала требуемого диапазона или формирование его умножением частоты, как показано на рис. 2.

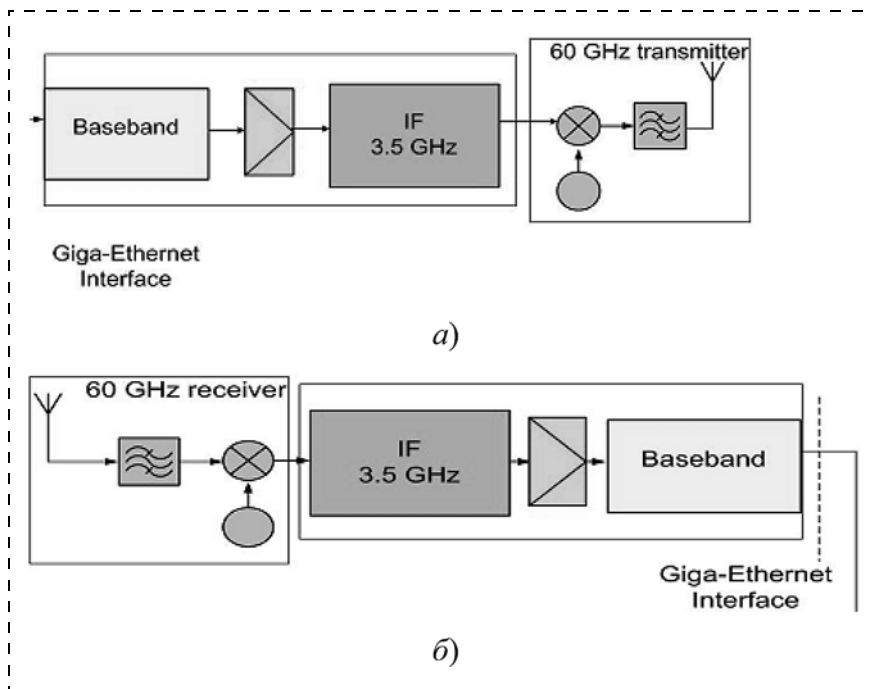


Рис. 1. Схемы с цифровой частью:

a — передатчик; *б* — приемник

Монолитные передатчик и приемник на основе умножения частоты сигналов в 8 раз описаны в работе [3]. Структурные схемы приемника и передатчика приведены на рис. 3. Топологии передатчика размерами $5,0 \times 3,5$ мм и приемника размерами $5,7 \times 5,0$ мм представлены на рис. 4.

Компания IBM совместно с MediaTek в 2010 г. представила набор МИС для создания СВЧ

37,7 мм². Микросхему вместе с антеннами монтируют в многослойный органический корпус или корпус типа LTCC.

SiGe BiCMOS МИС приемника для гигабитной передачи по стандартам IEEE 802.15.3с и 802.11.ad [5] изображена на рис. 6 (см. третью сторону обложки). Описан одноэлементный набор микросхем приемопередатчика для связи "точка—точка" с акцентом на многофункцио-

тракта, содержащего приемник и 16 антенн [4]. Микросхема супергетеродинного приемника реализована по 120-нм SiGe БиКМОП-технологии компании IBM (рис. 5, см. третью сторону обложки). Приемник в соответствии со стандартами IEEE 802.15.3с и 802.11ad работает с четырьмя каналами в зоне прямой видимости и вне ее. Скорость передачи данных каналов приемника составляет 5,3 Гбит/с в формате OFDM 16-QAM и 4,5 Гбит/с в формате SC 16-QAM. Каждый РЧ-блок приемника содержит малошумящий усилитель с регулируемым усилением в пределах 10...55 дБ, а также фазовращатель с регулируемым углом сдвига фазы до 360°. Мощность, потребляемая микросхемой приемника, — 1,8 Вт; занимаемая ею площадь кристалла —

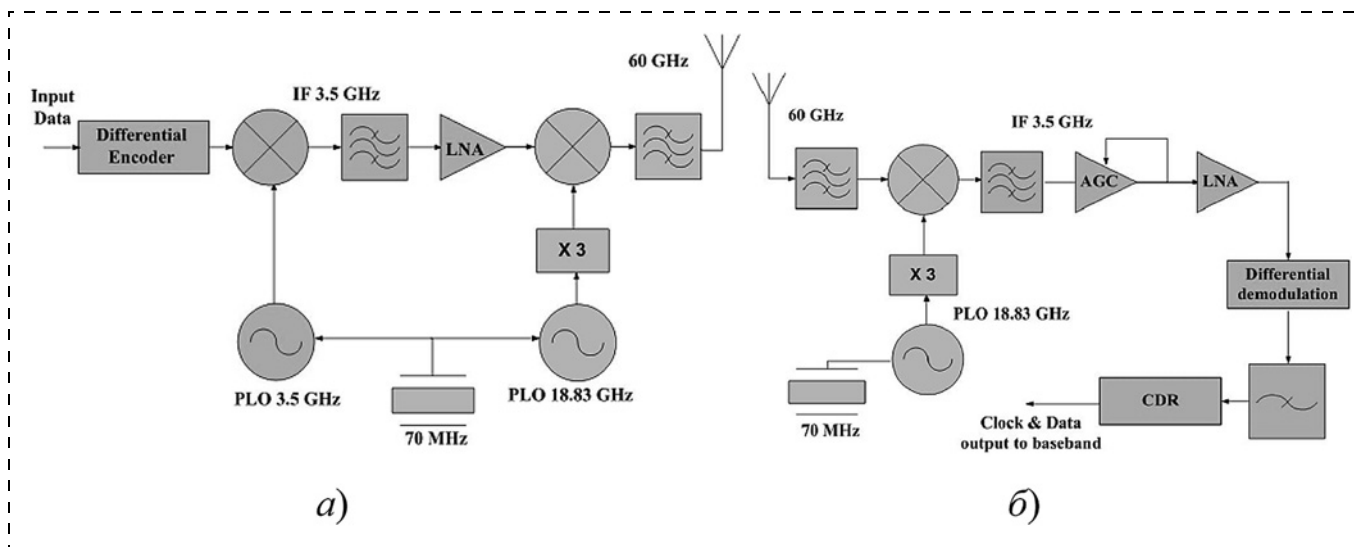


Рис. 2. Схемы с умножением частоты:

a — передатчик; *б* — приемник

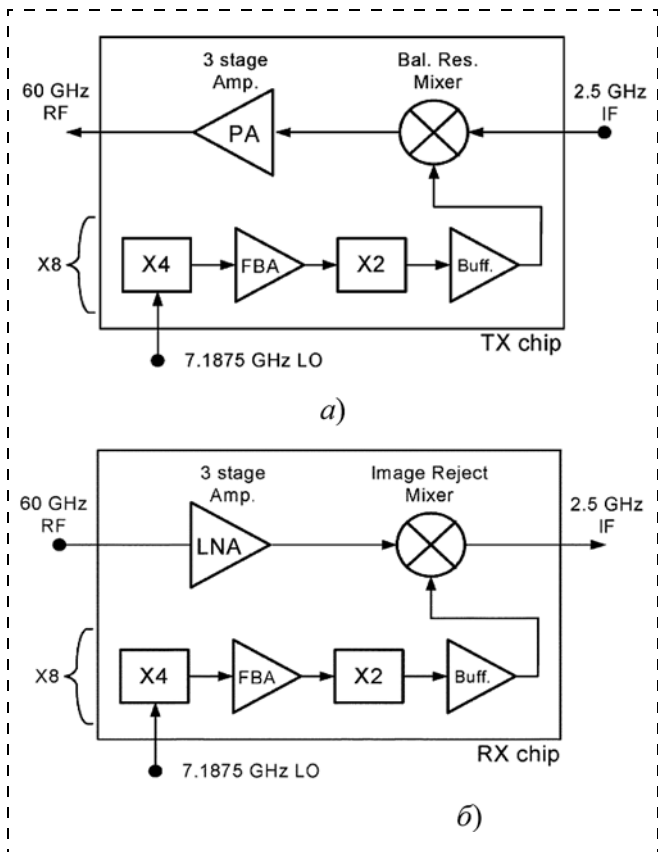


Рис. 3. Структурные схемы:
a — передатчика; *б* — приемника

нальный, но компактный 60-ГГц приемник. Далее описан 16-элементный набор микросхем приемопередатчика с фазированной решеткой для связи вне прямой видимости с акцентом на новый энергоэффективный передатчик с фазированной решеткой. Представлены примеры линии прямой видимости и линии не прямой видимости с гигабитной скоростью передачи данных.

Супергетеродинные приемные (рис. 7, *a*) и передающие (рис. 7, *б*) МИС диапазона 60 ГГц [6] созданы на основе 130 нм кремниво-германиевой БиКМОП технологии. Несмотря на то что конструкция не предусматривает встроенную антенну, разработанные образцы имеют высокую степень интеграции. Приемный модуль включает МШУ, смеситель ПЧ и ВЧ, квадратурный смеситель ВЧ и сигнала гетеродина, ФАПЧ и умножитель частоты на 3; передающий модуль включает УМ, преобразователь ПЧ, квадратурный смеситель сигнала гетеродина и ПЧ, ФАПЧ и умножитель частоты на 3. Достигнут коэффициент шума приемного модуля в 6 дБ, выходная мощность передающего модуля составляет 10...12 дБм.

Работа [7] описывает выполненный на 0,25 мкм SiGe БиКМОП-технологии интегрированный передатчик, включающий смеситель, ФАПЧ, предусилитель, фильтр зеркальной частоты и УМ (рис. 8, см. третью сторону обложки). Точка компрессии 1 дБ составила 10,5 дБм, продемонстрирована безошибочная передача данных с модуляцией QPSK OFDM со скоростью 5 Мбит/с на расстояние 5 м.

Разработанные чипы передатчиков канала связи V-диапазона с объемом передачи 28 Гбит/с NRZ (*non-return-to-zero* — амплитудная модуляция без нулевого значения) представлены в работе [8]. Передатчик (рис. 9) позволяет передавать данные со скоростью до 60 Гбит/с в V-диапазоне.

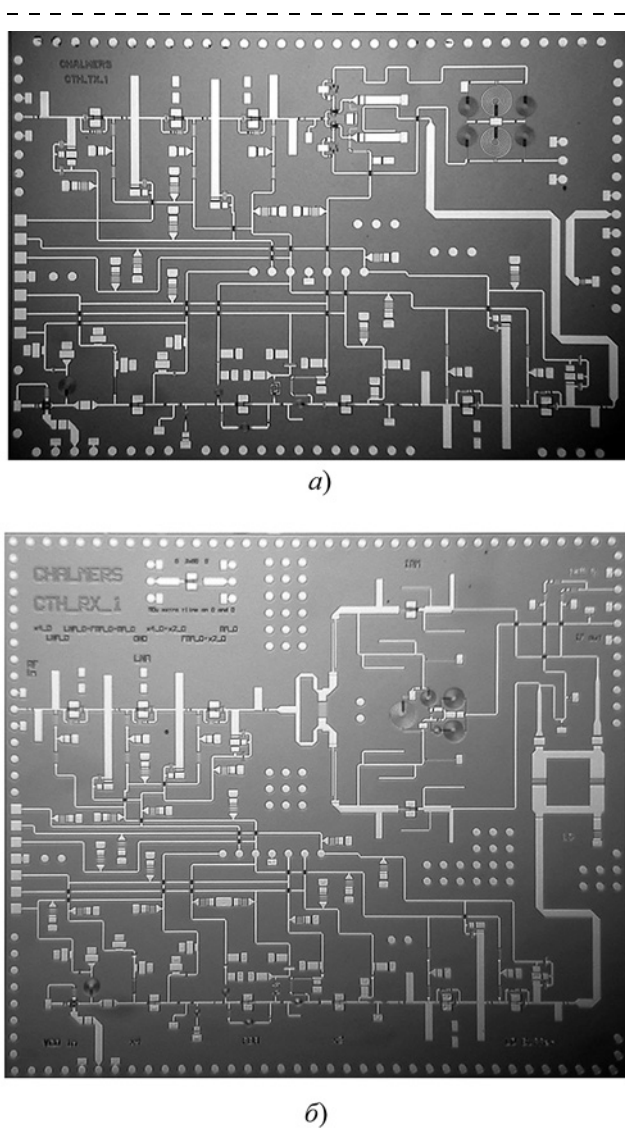


Рис. 4. Топология МИС:
a — передатчика; *б* — приемника

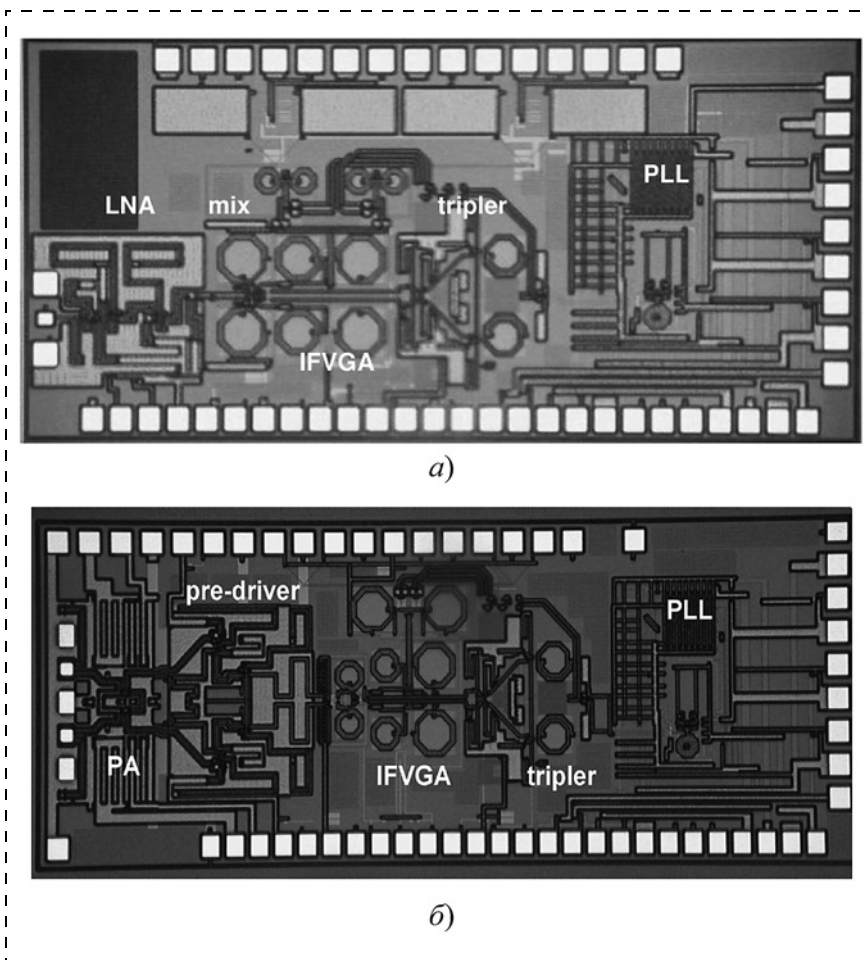


Рис. 7. Топология МИС:
a — приемника; *б* — передатчика

Реализован передатчик (рис. 10, см. третью сторону обложки) с изменением частоты в полосе 20...60 ГГц, который позволяет передавать 80 Гбит/с [9].

Полностью интегрированный 60-ГГц приемопередатчик прямого преобразования в 45-нм КНИ КМОП [10] для беспроводной связи с полным дуплексным режимом, работа которого обеспечивается с помощью новой, основанной на поляризации, технологии широкополосного реконфигурируемого подавления собственных помех в области антенны, изображен на рис. 11. При совместном подавлении помех в антенне и РЧ тракте достигается общее подавление собственных помех в 70 дБ в полосе подавления 1 ГГц и может поддерживаться в присутствии близких отражателей. Установлен канал связи на расстоянии более 0,7 м с отношением сигнал—помеха—шум—искажение (SINDR), равным 7,2 дБ.

Реконфигурируемый радиолокационный передатчик 60 ГГц, поддерживающий частотную,

импульсную и фазовую модуляцию радиолокационного сигнала с одного внешнего интерфейса [11] состоит из широкополосного умножителя частоты на 3, двухступенчатого драйвера, двух объединителей мощности и схемы основной частоты и последовательного ввода/вывода. Предлагаемая микросхема состоит из широкополосного умножителя частоты на 3, двухступенчатого драйвера, двух смесителей мощности со схемой основной полосы частот и схемой последовательного ввода-вывода. Измерения ИС в непрерывном режиме показывают среднюю выходную мощность 12,8 дБм от 54 до 67 ГГц с подавлением гармоник более 27 дБ. Измерения в ФМ и импульсном режиме показали генерацию коротких импульсов с минимальной шириной 25 пс, соответствующей ширине полосы сигнала 40 ГГц и скорости модулированного сигнала 10 Гбит/с соответственно. Изготовленная на КНИ 45-нм КМОП-процессе ИС (рис. 12, см. четвертую сторону обложки) потребляет 0,51 Вт и занимает площадь 1,95 мм².

Схема, предложенная в работе [12] (рис. 13), оригинальна использованием одного смесителя при работе на прием и передачу, при этом приемный и усилительные тракты коммутируются со смесителем переключателями с потерями менее 1,5 дБ. МИС изготовлена по 0,1-мкм mHEMT GaAs-технологии. Измеренный коэффициент

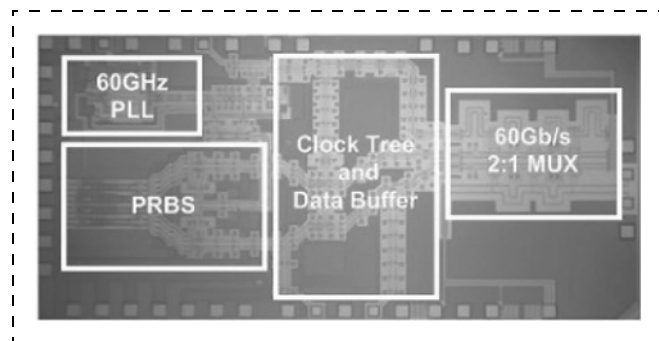


Рис. 9. Топология МИС передатчика

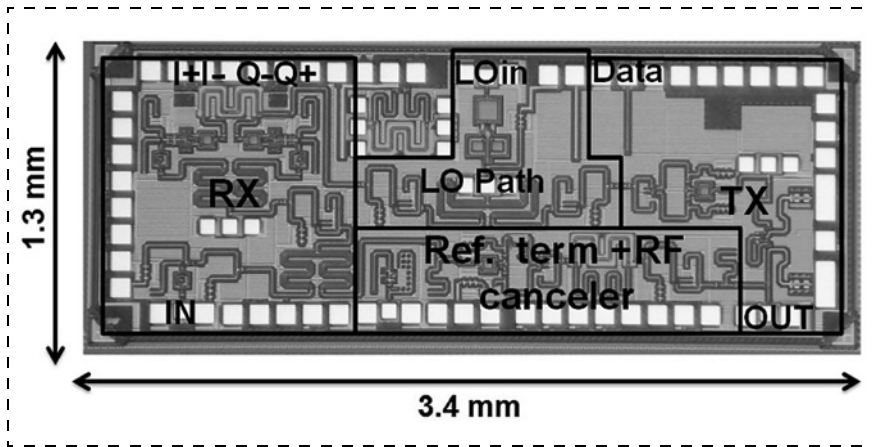


Рис. 11. Топология МИС приемопередатчика

шума составил менее 2,5 дБ на 60 ГГц, а выходная мощность насыщения усилителей достигает 20 дБм.

В работе [13] представлена новая конструкция сверхширокополосного передатчика диапазона 60 ГГц с простой архитектурой и возможностью разрешения в широком диапазоне (рис. 14, см. четвертую сторону обложки). Реализованный на техпроцессе OMMIC 0,1 мкм GaAs pHEMT-передатчик содержит генератор, буферный усилитель, усилитель средней мощности, два гене-

ратора импульсов. При времени повторения импульсов 5 нс, длительности импульса 500 пс и напряжении питания 3 В передатчик потребляет всего 101 мВт и имеет пиковую мощность передачи 9,2 дБм, что соответствует 0,5 нДж на импульс энергии и подходит для применения беспроводной сенсорной сети ближнего действия.

Приемопередающие МИС диапазона 60 ГГц с интегрированной антенной

Характеристики антенны зависят от целевого применения. Для приложений загрузки файлов с киоска (модель использования 5 для IEEE-802.15.3с) рассматривается конфигурация линии прямой видимости на ограниченном расстоянии (до 3 м) и обычно требуется усиление 5 дБи. Для беспроводного приложения HDMI (модель использования 1 для IEEE-802.15.3с) рекомендуется применять конфигурацию без прямой видимости на максимальном расстоянии 10 м. В этом случае ожидается усиление 14 дБи с возможнос-

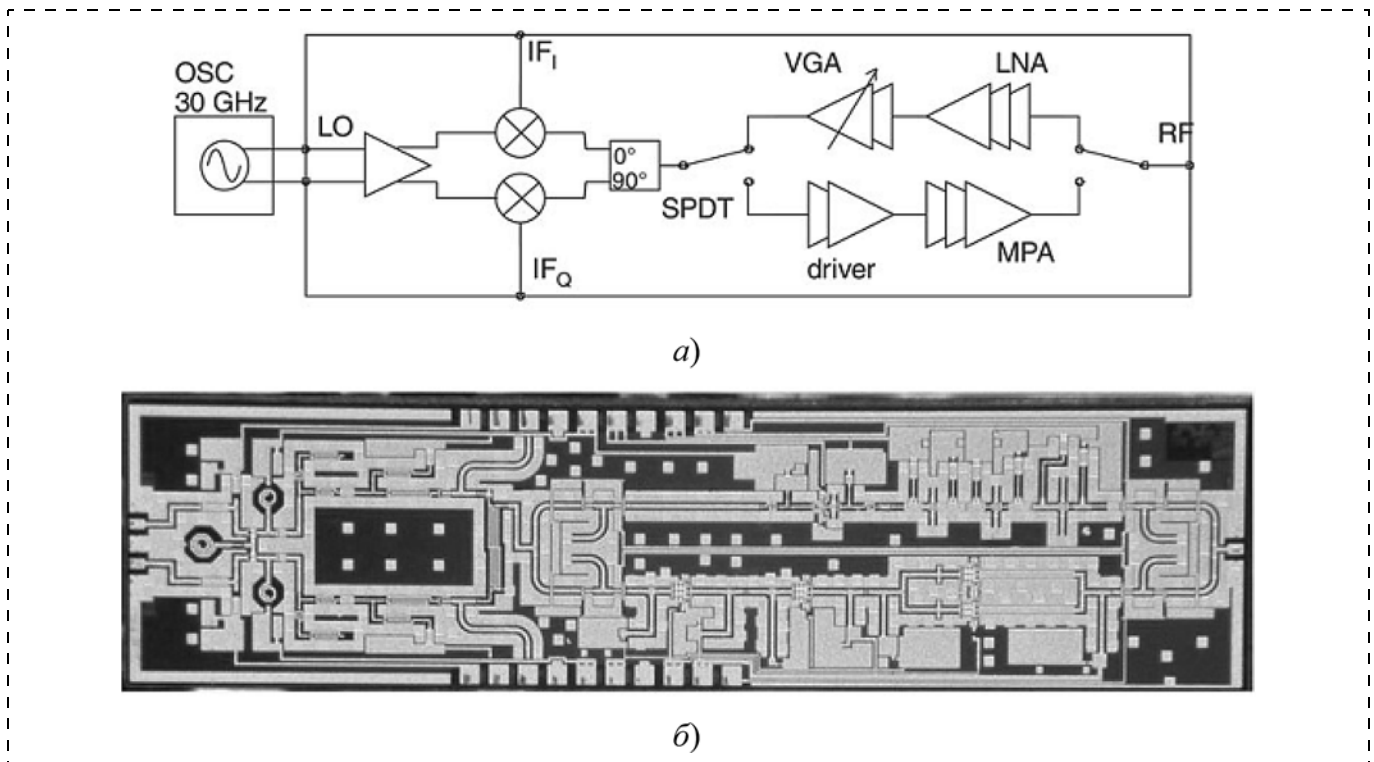


Рис. 13. ППМ:
а — схема; б — топология

тиями формирования луча для увеличения бюджета канала и предотвращения эффектов многолучевого распространения, создаваемых присутствием человека и окружающей средой [14].

В работе [15] представлен передающий модуль, состоящий из интегрированных генератора, управляемого напряжением (ГУН), смесителя, усилителя мощности и выходной антенны, предназначенный для передачи данных на частоте 60 ГГц (рис. 15, см. четвертую сторону обложки). Модуль реализован на основе 65-нм КМОП-технологии. Рабочий диапазон усилителя в данном модуле 54–61 ГГц, максимальная выходная мощность 12,5 дБм (соответствует 17,8 мВт), коэффициент усиления 18 дБ. Значения коэффициента шума не представлены. Размеры модуля составляют $1,96 \times 1,96$ мм.

В работе [16] также описывается интегрированный передающий модуль с антенной, созданный на основе 65-нм КМОП-технологии. Рабочий диапазон усилителя в данном модуле 57...65 ГГц, потери преобразования от -5 до 0 дБ. Площадь модуля составляет $0,64 \text{ мм}^2$ (рис. 16).

В работе [17] представлен малошумящий усилитель с интегрированной антенной для диапазона частот 58...65 ГГц. Усилитель реализован по SiGe НВТ-технологии с технологическими нормами 350 нм. Усиление МШУ — 12 дБ, коэффициент шума — не более 9,5 дБ, размеры кристалла $3,0 \times 2,8$ мм (рис. 17, см. четвертую сторону обложки).

В [18] представлена новая концепция интегрированной на чипе антенны миллиметрового диапазона в виде диэлектрического резонатора. Керамическая сфера диаметром 1,58 мм распо-

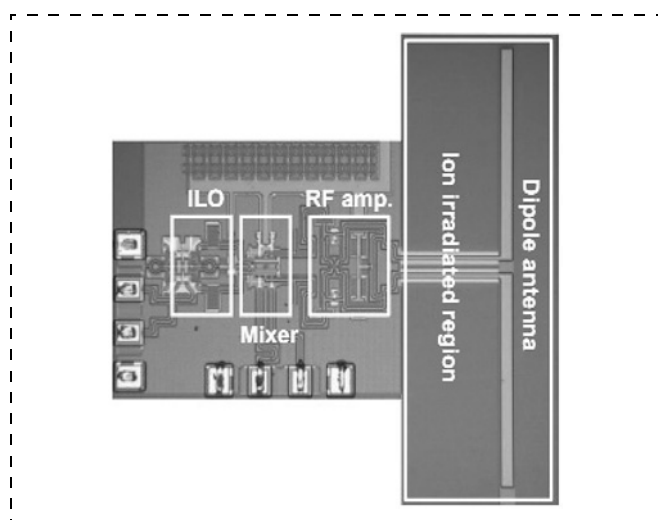


Рис. 16. Передающий модуль для частоты 60 ГГц

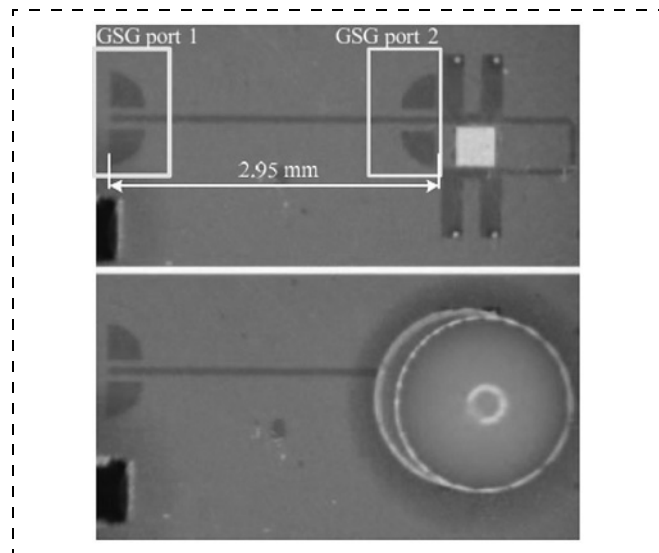


Рис. 18. Фотографии антенны до и после монтажа диэлектрической сферы

ложена на поверхности ИС и возбуждается микрополосковой линией. В слое полимера, покрывающем кремниевую подложку, вблизи фидера вытравлена впадина. Диэлектрическая сфера автоматически позиционируется с большой точностью во впадине (рис. 18).

Заключение

Приемопередающие системы на кристалле для радиочастотных трактов потребительских беспроводных сетей 5G, работающих в диапазоне 60 ГГц, в основном реализуют на кремниевой КМОП- и SiGe БиКМОП-технологиях. КМОП-технология дешева в производстве, хорошо подходит для малопотребляющих логических схем, БиКМОП-технология более гибкая в реализации логики и радиочастотных (РЧ) трактов с хорошими характеристиками. Однако данные технологии не позволяют реализовать переключатели, что усложняет реализацию цифровых фазовращателей и аттенюаторов, и уступают устройствам на основе соединений группы III—V в части мощности и шумовых свойств. На сегодняшний день GaAs является наиболее используемой технологией в РЧ трактах миллиметрового диапазона (в виде однофункциональных МИС УМ и МШУ) благодаря своим стабильным высокочастотным характеристикам, однако многофункциональные системы на кристалле диапазона 60 ГГц на основе этой технологии пока не очень распространены.

Все перечисленные технологии используют подложки с высокой диэлектрической проница-

емостью и, следовательно, большими потерями на излучение в подложку. Антенны диапазона 60 ГГц, особенно высоконаправленные, требуют значительной площади и многослойной реализации, что затрудняет их монолитное исполнение в составе МИС. Это стимулировало развитие технологии компактной многослойной гибридной сборки приемных и передающих моделей.

Список литературы

1. Вишнеvский В., Фролов С., Шахнович И. Миллиметровый диапазон как промышленная реальность. Стандарт IEEE 802.15.3c и спецификация WirelessHD // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 3. С. 70—78.
2. Rakotondrainibe L., Kokar Y., Zaharia G. 60 GHz High Data Rate Wireless Communication System // Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th.
3. Gunnarsson S. E., Karnfeit C., Zirath H. Highly Integrated 60 GHz Transmitter and Receiver MMICs in a GaAs pHEMT Technology // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005. Vol. 40, N. 11. P. 2174—2186.
4. Johnson R. C. IBM, MediaTek to debut 60-GHz chipset. URL: www.eetimes.com/electronics-news/4199580/IBM-MediaTek-to-debut-60-GHz-chipset, 2010.
5. Valdes-Garcia A., Reynolds S., Natarajan A., Dong Kam, Duixian Liu, Jie-Wei Lai. Single-element and phased-array transceiver chipsets for 60-ghz Gb/s communications // IEEE Communications Magazine. 2011. Vol. 49, N. 4. P. 120—131.
6. Reynolds S. K., Floyd B. A., Pfeiffer U. R. Silicon 60-GHz Receiver and Transmitter Chipset for Broadband Communications // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2006. Vol. 41, N. 12. P. 2820—2831.
7. Glisic S., Schmalz K., Herzel F. et al. A Fully Integrated 60 GHz Transmitter Front—End in SiGe BiCMOS Technology // Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF), 2011 IEEE 11th Topical Meeting, 2011. P. 149—152.
8. Ping-Chuan Chiang, Hao-Wei Hung, Hsiang-Yun Chu, Guan-Sing Chen, Jri Lee. 60 Gb/s NRZ and PAM4

Transmitters for 400 GbE in 65nm CMOS // IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2014. P. 42—44.

9. Gharib A., Weigel R., Kissinger D. A Versatile 10—80-Gb/s PRBS-Based Broadband Transmitter With Arbitrary 20—60-GHz Spectrum Shifting // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 2016. Vol. 64, Is. 11.

10. Dinc T., Chakrabarti A., Krishnaswamy H. A 60 GHz CMOS Full-Duplex Transceiver and Link with Polarization-Based Antenna and RF Cancellation // IEEE Journal of Solid-State Circuits. May 2016. Vol. 51, N. 5. P. 1125—1140.

11. Lee W., Dinc T., Valdes-Garcia A. Reconfigurable 60-GHz Radar Transmitter SoC with Broadband Frequency Tripler in 45nm SOI CMOS // 2019 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. P. 43—46.

12. Lopez-Diaz D., Kallfass I., Tessmann A. High-performance 60 GHz MMICs for wireless digital communication in 100 nm mHEMT technology // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. 2011. N. 3. P. 107—113.

13. Jin L., Rolland N. A 0.5 nJ/b 60 GHz ultra wideband transmitter for short range wireless sensor network applications // Microw Opt Technol Lett. 2020. Vol. 62. P. 2281—2288.

14. Calvez C., Pilard R., Person C., Coupez, J. P. et al. Millimeter-wave antenna designs for 60 GHz applications: SoC and SiP approaches // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. 2011. N. 3. P. 179—188.

15. Ghaffar F. A. 60 GHz system-on-chip (SoC) with built-in memory and an on-chip antenna // Antennas and Propagation (EuCAP), 2014, 8th European Conference on. P. 531—532.

16. Rui Wu, Wei Deng, Shinji Sato, Takuichi Hirano, Ning Li. A 60-GHz CMOS Transmitter with Gain-Enhanced On-Chip Antenna for Short-Range Wireless Interconnections // IEICE Transactions on Electronics. 2015. Vol. E98-C, N. 4. P. 304—314.

17. Jian Zhang. Low Noise Amplifier With Integrated Balanced Antenna for 60 GHz Wireless Communications // Antennas and Propagation, IEEE Transactions. 2014. Vol. 62, Is. 6. P. 3407—3411.

18. Cuenca D. L., Hesselbarth J., Alavi G. Chip-mounted dielectric resonator antenna with alignment and testing features // 2016 46th European Microwave Conference (EuMC), London. 2016. P. 723—726.

B. G. Putintsev, Postgraduate, e-mail: bogdanputintsev@yahoo.com,
Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Moscow, 117105, Russian Federation

Corresponding author:

Bogdan Putintsev, Postgraduate, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Moscow, 117105, Russian Federation, e-mail: sadvd2016@mail.ru

60 GHz Transceiver Monolithic Integrated Circuits: an Overview

Received on June 08, 2020

Accepted on June 31, 2020

The overview of 60 GHz transceiver monolithic integrated circuits is presented. In the first part, high-speed transmitter and receiver systems-on-chip are reviewed, in the second part, transmitter and receiver systems-on-chip with integrated antennas are reviewed.

Keywords: V-band, transceiver, system-on-chip

For citation:

Putintsev B. G. 60 GHz Transceiver Monolithic Integrated Circuits: an Overview, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 20, no. 7, pp. 393–400.

DOI: 10.17587/nmst.22.393-400

References

1. **Vishnevskiy V., Frolov S., Shakhnovich I.** Millimeter wave band as an industrial reality. IEEE 802.15.3c standart and Wireless HD specification, *ELECTRONICS: Science, Technology, Business*. 2010, no. 3, pp. 70–78 (in Russian).
2. **Rakotondrainibe L., Kokar Y., Zaharia G.** 60 GHz High Data Rate Wireless Communication System, *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009*. IEEE 69th.
3. **Gunnarsson S. E., Karnfeit C., Zirath H.** Highly Integrated 60 GHz Transmitter and Receiver MMICs in a GaAs pHEMT Technology, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2005, vol. 40, no. 11, pp. 2174–2186.
4. **Johnson R. C.** IBM, MediaTek to debut 60-GHz chipset, www.eetimes.com/electronics-news/4199580/IBM-MediaTek-to-debut-60-GHz-chipset, 2010.
5. **Valdes-Garcia, A., Reynolds S., Natarajan A., Dong Kam, Duixian Liu, Jie-Wei Lai** Single-element and phased-array transceiver chipsets for 60-ghz Gb/s communications, *IEEE Communications Magazine*, 2011, vol. 49, no. 4, pp. 120–131.
6. **Scott K. Reynolds, Brian A. Floyd, Ullrich R. Pfeiffer.** Silicon 60-GHz Receiver and Transmitter Chipset for Broadband Communications, *IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS*. 2006, vol. 41, no. 12, pp. 2820–2831.
7. **Glisic S., Schmalz K., Herzel F.** A Fully Integrated 60 GHz Transmitter Front—End in SiGe BiCMOS Technology, *Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF), 2011 IEEE 11th Topical Meeting*, 2011. pp. 149–152.
8. **Ping-Chuan Chiang, Hao-Wei Hung, Hsiang-Yun Chu, Guan-Sing Chen, Jri Lee.** 60Gb/s NRZ and PAM4 Transmitters for 400GbE in 65nm CMOS, *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2014. pp. 42–44.
9. **Gharib A., Weigel R., Kissinger D.** A Versatile 10–80-Gb/s PRBS-Based Broadband Transmitter With Arbitrary 20–60-GHz Spectrum Shifting, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 2016. Vol. 64, Issue: 11.
10. **Dinc T., Chakrabarti A., Krishnaswamy H.** A 60 GHz CMOS Full-Duplex Transceiver and Link with Polarization-Based Antenna and RF Cancellation, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, May 2016, vol. 51, no. 5, pp. 1125–1140.
11. **Lee W., Dinc T., Valdes-Garcia A.** Reconfigurable 60-GHz Radar Transmitter SoC with Broadband Frequency Tripler in 45nm SOI CMOS, *2019 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*, 2019, pp. 43–46.
12. **Lopez-Diaz D., Kalfass I., Tessmann A.** High-performance 60 GHz MMICs for wireless digital communication in 100 nm mHEMT technology, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2011, no. 3, pp. 107–113.
13. **Jin L., Rolland N.** A 0.5 nJ/b 60 GHz ultra wideband transmitter for short range wireless sensor network applications, *Microw Opt Technol Lett*. 2020, vol. 62, pp. 2281–2288.
14. **Calvez C., Pilard R., Person C., Coupeze, J. P.** Millimeter-wave antenna designs for 60 GHz applications: SoC and SiP approaches, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2011, no. 3, pp. 179–188.
15. **Ghaffar F. A.** 60 GHz system-on-chip (SoC) with built-in memory and an on-chip antenna, *Antennas and Propagation (EuCAP), 2014, 8th European Conference on*, pp. 531–532.
16. **Rui Wu, Wei Deng, Shinji Sato, Takuichi Hirano, Ning Li.** A 60-GHz CMOS Transmitter with Gain-Enhanced On-Chip Antenna for Short-Range Wireless Interconnections, *IEICE Transactions on Electronics*, 2015, vol. E98-C, no. 4, pp. 304–314.
17. **Jian Zhang.** Low Noise Amplifier With Integrated Balanced Antenna for 60 GHz Wireless Communications, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions*. 2014, vol. 62, issue 6, pp. 3407–3411.
18. **Cuenca D. L., Hesselbarth J., Alavi G.** Chip-mounted dielectric resonator antenna with alignment and testing features, *2016 46th European Microwave Conference (EuMC)*, London, 2016, pp. 723–726.

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

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

Сдано в набор 25.06.2020. Подписано в печать 24.07.2020. Формат 60×88 1/8. Заказ МС720. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансед солошнз». Отпечатано в ООО «Авансед солошнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье Б. Г. Путинцева
 «ОБЗОР ПРИЁМОПЕРЕДАЮЩИХ МИС ДИАПАЗОНА 60 ГГц»

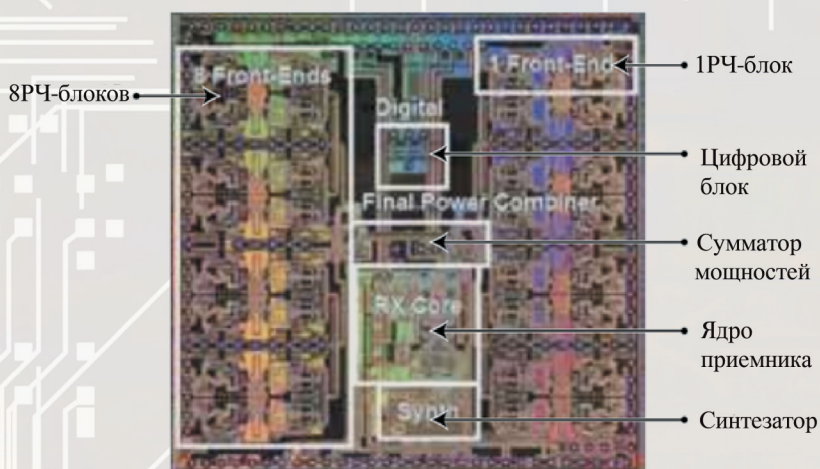


Рис. 5. Микросхема 60 ГГц приемника компаний IBM/MediaTek

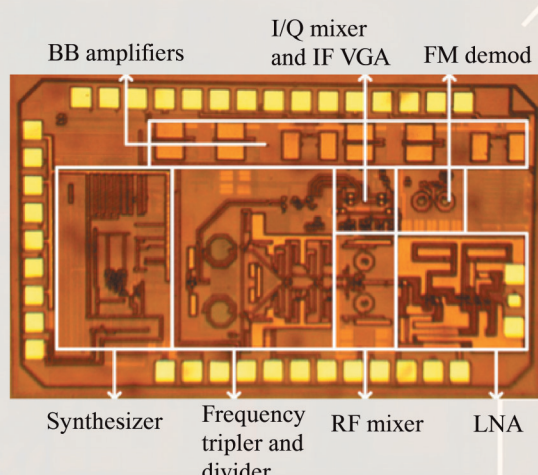


Рис. 6. Топология МИС при мника

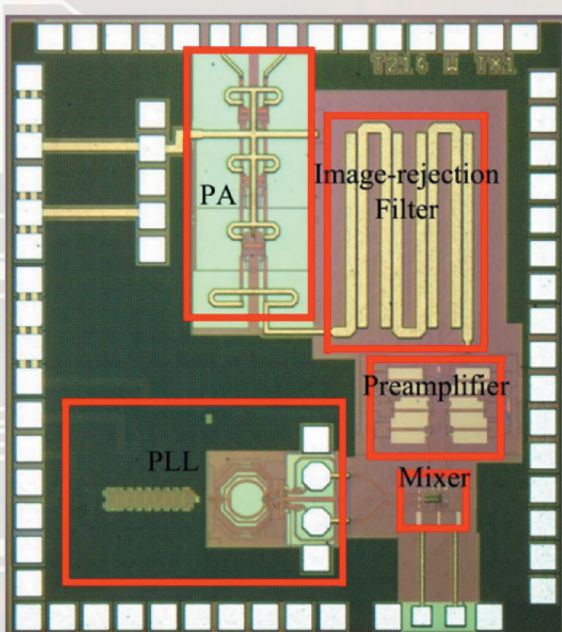


Рис. 8. Топология МИС передатчика

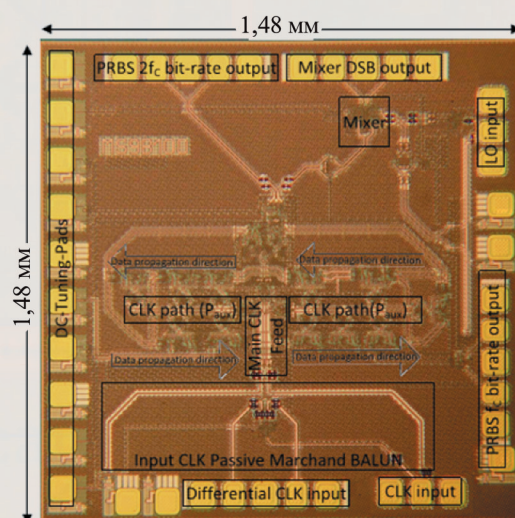


Рис. 10. Передатчик с изменением частоты в полосе 20...60 ГГц

Рисунки к статье Б. Г. Путинцева
«ОБЗОР ПРИЁМОПЕРЕДАЮЩИХ МИС ДИАПАЗОНА 60 ГГц»

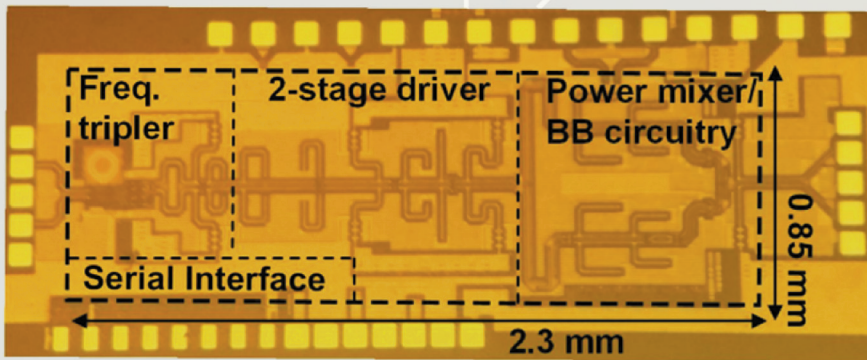


Рис. 12. Топология МИС передатчика

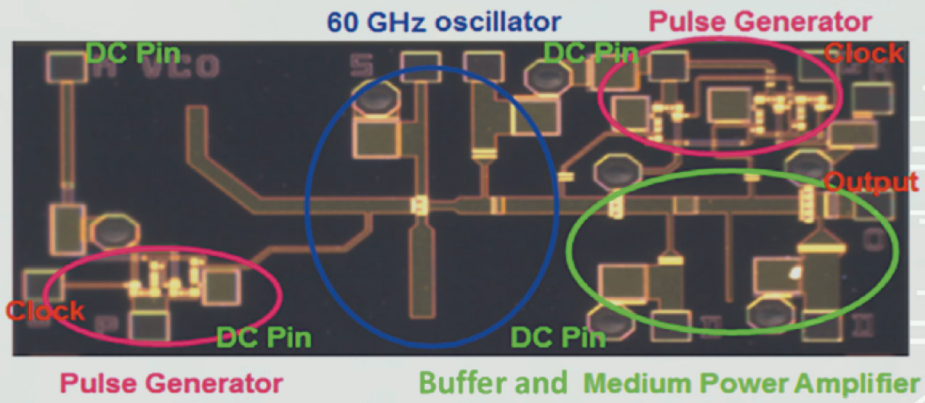


Рис. 14. Топология МИС передатчика

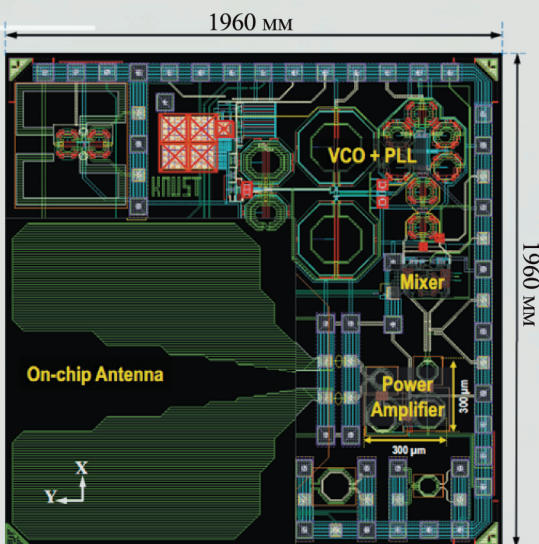


Рис. 15. Передающий модуль для частоты 60 ГГц
(топологический чертеж)

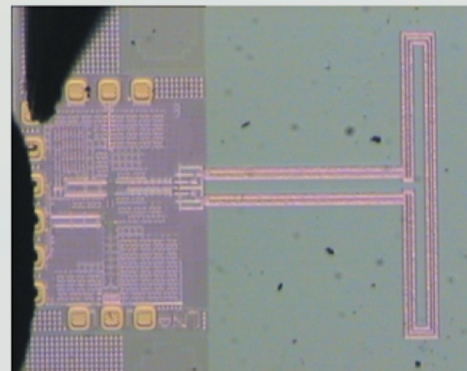


Рис. 17. Фотография кристалла МШУ с антенной