

ISSN 1813-8586

НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 21, №12, 2019

50µm
10µm
1.0µm
270x270 nm
2.5x2.5 µm
3x3 µm
20x20 nm
1.0µm

20 лет журналу 1999-2019

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

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

Vol. 21, No. 12, 2019

The articles are published
in Russian and English

2020

ЯНВАРЬ

| ПН | ВТ | СР | ЧТ | ПТ | СБ | ВС |
|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | | |

ФЕВРАЛЬ

| ПН | ВТ | СР | ЧТ | ПТ | СБ | ВС |
|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | | | 1 | 2 |
| 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | |

МАРТ

| ПН | ВТ | СР | ЧТ | ПТ | СБ | ВС |
|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | | | | 1 |
| 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| 30 | 31 | | | | | |

АПРЕЛЬ

| ПН | ВТ | СР | ЧТ | ПТ | СБ | ВС |
|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| 27 | 28 | 29 | 30 | | | |

МАЙ

| ПН | ВТ | СР | ЧТ | ПТ | СБ | ВС |
|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | | 1 | 2 | 3 |
| 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 |

ИЮНЬ

| ПН | ВТ | СР | ЧТ | ПТ | СБ | ВС |
|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
| 29 | 30 | | | | | |

ИЮЛЬ

| ПН | ВТ | СР | ЧТ | ПТ | СБ | ВС |
|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | | |

АВГУСТ

| ПН | ВТ | СР | ЧТ | ПТ | СБ | ВС |
|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | | | 1 | 2 |
| 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| 31 | | | | | | |

СЕНТЯБРЬ

| ПН | ВТ | СР | ЧТ | ПТ | СБ | ВС |
|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| 27 | 28 | 29 | 30 | | | |

ОКТАБРЬ

| ПН | ВТ | СР | ЧТ | ПТ | СБ | ВС |
|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | |

НОЯБРЬ

| ПН | ВТ | СР | ЧТ | ПТ | СБ | ВС |
|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | | | | 1 |
| 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| 30 | | | | | | |

ДЕКАБРЬ

| ПН | ВТ | СР | ЧТ | ПТ | СБ | ВС |
|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | | |

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 21. № 12 ✧ 2019

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 и печатаются в журнале на русском и английском языках

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

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

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

Горнев Е. С., д.т.н., проф.

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.

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.)

Фокин В. А., к.х.н. (ред. перевода)

Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

20 лет журналу "Нано- и микросистемная техника" 699

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Федоров Ю. В., Бугаев А. С., Гнатюк Д. Л., Павлов А. Ю., Матвеев О. С., Павлов В. Ю., Слаповский Д. Н., Томош К. Н., Енюшкина Е. Н., Галиев Р. Р., Майтама М. В., Зуев А. В., Крапущин Д. В., Гамкрелидзе С. А., Путинцев Б. Г., Мальцев П. П. Макетирование приемно-передающих модулей 5-миллиметрового диапазона длин волн на базе отечественных монолитных интегральных схем на нитриде галлия 702

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Редькин С. В. Кубический карбид кремния на кремнии для СВЧ, силовой и оптоэлектроники 709

Булярский С. В., Коива Д. А., Першина Е. А. Формирование пленок полупроводникового оксида титана методом магнетронного напыления 720

Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Несмелов С. Н., Дзядх С. М., Горн Д. И. Современное состояние исследований в области создания униполярных барьерных структур на основе теллурида кадмия и ртуты 726

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Зенченко Н. В. Исследование тепловых процессов в мощных полевых транзисторах на основе нитрида галлия 738

Хабибуллин Р. А. Современное состояние и перспективы создания квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона частот в России 742

Указатель статей, опубликованных в журнале "Нано- и микросистемная техника" в 2019 г. 749

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. 21

No. 12

2019

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
Surov 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.)
Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)
Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.)
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)
Fokin V. A., Cand. Sci. (Chem.)
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

20 years of the Journal "Nano- and Microsystems Technology" 699

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Fedorov Yu. V., Bugayev A. S., Gnatyuk D. L., Pavlov A. Yu., Matveyenko O. S., Pavlov V. Yu., Slapovsky D. N., Tomosh K. N., Enyushkina E. N., Galiyev R. R., Maytama M. V., Zuev A. V., Krapukhin D. V., Gamkrelidze S. A., Putintsev B. G., Maltsev P. P. Prototyping of V-band Transmit-Receive Modules on the Basis of the Domestic Monolithic Integrated Circuits on Gallium Nitride 706

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Red'kin S. V. Cubic Silicon Carbide on Silicon for the Microwave, Power and Optoelectronics 716

Bulyarsky S. V., Koiva D. A., Pershina E. A. The Formation of Semiconductor Titanium Dioxide Thin Films by RF Magnetron Sputtering 724

Voitsekhovskiy A. V., Kulchitsky N. A., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Gorn D. I. Current State of Research in the Field of HgCdTe-based Unipolar Barrier Structures 733

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Zenchenko N. V. Research of the Thermal Processes in High-power Field-effect Transistors based on Gallium Nitride 740

Khabibullin R. A. Current State and Prospects for Development of Quantum-Cascade Lasers of the Terahertz Frequency Range in Russia 746

Index of articles published in the Journal "Nano- and Microsystems Technology" in 2019 749

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

20 ЛЕТ

ЖУРНАЛУ "НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"

В декабре 1999 г. вышел "нулевой номер" журнала "Микросистемная техника", издаваемого Обществом с ограниченной ответственностью "Издательство "Новые технологии" (ISSN 1684-6419, 1999—2004 гг.). С 2005 г. журнал выходит под названием "Нано- и микросистемная техника" (ISSN 1813-8586). Новое название ориентировано на расширение проблематики журнала с учетом развития микросистемной техники и перехода от технологических приемов микроэлектроники к нанотехнологии с использованием наноматериалов для создания наносистем.

Идея создания журнала была связана с концентрацией усилий российских ученых в направлении, которое бурно развивалось в США при поддержке Управления перспективных исследований министерства обороны (DARPA), утвердившего в 1994 г. программу "Microelectromechanical Systems" (MEMS), а также после утверждения Правительством США в 2000 г. программы "Национальная нанотехнологическая инициатива".

Работы в области нанотехнологий во всем мире продолжают и в настоящее время (см. приложение).

Статьи, опубликованные в журнале НМСТ, позволили подготовиться к формированию документов для принятия Распоряжения Правительства РФ от 25 августа 2006 г. № 1188-р и "Программы координации работ в области нанотехнологий и наноматериалов в Российской Федерации" с 2007 г. Срок окончания действия Программы не установлен.

В соответствии с планом работы Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям, утвержденным Заместителем Председателя Правительства Российской Федерации, запланировано рассмотрение вопроса о развитии прикладных нанотехнологий в оборонно-промышленном комплексе и перспективах использования нанотехнологий при создании технических средств специального назначения.

Параллельно с Программой развивался и журнал НМСТ.

Целью междисциплинарного теоретического и прикладного научно-технического журнала "Нано- и микросистемная техника" является освещение современного состояния, перспектив и тенденций развития нано- и микросистемной техники, представление результатов исследований и разработок, а также их внедрения в различные области науки, технологии и производства. Микросистемная техника (*microsystems engineering — MSE*) на базе технологии микросистем (*microsystems technology — MST*) и микроэлектромеханических систем (*microelectromechanical systems — MEMS*) использует планарные и объемные конструкционные свойства элементов при создании нового поколения устройств, приборов и механизмов повышенной сложности, применяемых в радиотехнике, оптике, машиностроении, приборостроении, химии и биомедицине на основе микроэлектроники и наносистем (*nanosystems*).

Ключевые слова, описывающие содержание журнала: нанотехнологии, зондовая микроскопия, микромашины и наносистемы, молекулярная электроника, биоактивные нанотехнологии, элементы датчиков и биочипы, микроэлектромеханические системы, микрооптоэлектромеханические системы, биомикроэлектромеханические системы, микро- и наноэлектронные "системы-на-кристалле".

Тематические разделы журнала: элементы микро- и наносистемной техники (НМСТ); материаловедческие и технологические основы НМСТ; нанотехнология и зондовая микроскопия; молекулярная электроника и биоэлектроника.

ника; конструирование и моделирование МНСТ; системы-на-кристалле; применение МНСТ.

С мая 2003 г. журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения информационных технологий и вычислительных систем Российской академии наук, реорганизованного с 2008 г. в Отделение нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук.

С 2003 г. журнал МНСТ включен в "Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (по состоянию на 09.08.2018)" по следующим группам научных специальностей и соответствующим им отраслям науки: 05.27.00 — электроника; 01.04.00 — физика. Журнал включен также в состав журналов научной электронной библиотеки — elibrary.ru.

Журнал МНСТ указан в составе перечня "Рецензируемые научные издания, входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования, и в соответствии с пунктом 5 правил формирования перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее — Перечень), утвержденных приказом Минобрнауки России от 12 декабря 2016 г. № 1586 (зарегистрирован Минюстом России 26 апреля 2017 г., регистрационный № 46507), включенные в Перечень (по состоянию на 25 сентября 2017 г.)". МНСТ относится к журналам, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и ученой степени доктора наук по следующей отрасли науки: 02.00.00 — химические науки.

Ряд университетов страны проводят обучение по направлениям подготовки "Нанотехнологии и микросистемная техника": Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) — СПбГЭТУ "ЛЭТИ"; МИРЭА — Российский технологический университет; Южный федеральный университет.

С 2005 г. журнал индексируется в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). В 2016 г. журнал включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science. С 2014 г. статьи имеют дополнительный список литературы на латинице (References) и журнал включен в международную базу технической литературы на английском языке INSPEC. С 2017 г. статьям присваивают DOI.

С 2015 г. все статьи в основной печатной версии переводились с русского на английский язык и журнал включен в международную реферативную базу данных Chemical Abstracts (CA(pt), Chemical Abstracts Service (CAS)), которая включена в Medline на платформе Web of Science.

В соответствии с требованиями РИНЦ с 2018 г. в составе редакционного совета и редакционной коллегии Журнала МНСТ доля иностранных членов составляет 30 %.

Транслитерированное название журнала NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA и параллельное название на английском языке NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY.

Выражаю глубокую благодарность всем членам редсовета и редколлегии журнала МНСТ, а также авторам статей за плодотворное сотрудничество в течение 20 лет.

*Главный редактор журнала МНСТ
д-р техн. наук, проф. П. П. Мальцев*

ПРИОРИТЕТЫ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

| Страны ЕС* | США** | Китай*** |
|---|---|---|
| Эффективные процессы производства | Непрерывное лидерство в области искусственного интеллекта, квантовой информатики (QIS), а также передовой промышленной робототехники, в особенности с поддержкой промышленного интернета вещей (IIoT) и машинного обучения | Переловая электроника. Передовое производство, интеллектуальное производство, робототехника, аддитивное производство |
| Нанотехнологии | Передовые материалы | Новые материалы, нанотехнологии |
| Информационно-коммуникационные технологии | Обеспечение стратегических вычислений, машинного обучения, автономных систем и приложений; развитие интеллектуального и цифрового производства | Информационные технологии; телекоммуникации |
| Биотехнологии; Здравоохранение, демографические изменения и благосостояние; сельское и лесное хозяйство, водные экосистемы и биоэкономика | Развитие медицинских исследований, в особенности в области персонализированной медицины, а также в областях, недостаточно охваченных промышленным производством, профилактика заболеваний и укрепление здоровья, а также преобразование биомедицинских открытий в спасительную диагностику и лечение. Обеспечение использования передовых и точных технологий в сельском хозяйстве и аквакультуре, включая использование встроенных датчиков, аналитику данных и методов машинного обучения с целью минимизации сельскохозяйственных ресурсов и максимального увеличения количества и качества сельскохозяйственной продукции | Здравоохранение и медицина, в том числе нейронаука, фармацевтика, биофармацевтика; биотехнологии. Сельское хозяйство, в том числе агропродовольствие; биотехнологии; пищевая промышленность. Водные и минеральные ресурсы; экология; окружающая среда; глубокая разведка и бурение; океанография; морские технологии |
| Чистая и эффективная энергетика | Обеспечение доступа к внутренним источникам чистой, доступной и надежной энергии | Энергетика, гидроэнергетика, энергосбережение, новое поколение атомной энергетики, возобновляемые и невозобновляемые источники энергии |
| Безопасность в сфере продуктов питания и энергетики | Развитие национальной безопасности посредством стимулирования исследований и разработок в области гиперзвуковых систем, модернизации ядерных технологий, разработки передовой микроэлектроники, вычислительных приборов и кибертехнологий | Кибербезопасность |
| Экологически чистый интеллектуальный транспорт. Исследования космического пространства | Исследования и инновации в космосе, обеспечение лидерства в космосе для долгосрочных космических полетов, производства в космосе, использования ресурсов космоса, долгосрочного хранения и управления криогенным топливом, а также использования передовых космических энергетических и инженерных возможностей космоса | Исследования космоса, авиакосмическое оборудование; навигация и транспорт |
| <p><i>Примечание.</i></p> <p>* Science, Technology and Innovation in Europe. 2018. page 32. Societal challenges. URL: https://eas.europa.eu/sites/eas/files/2018_science_technology_and_innovation_in_europe_en.pdf</p> <p>** Memorandum For The Heads Of Executive Departments And Agencies. URL: https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/07/M-18-22.pdf</p> <p>*** The 13th five-year plan for economic and social development of the People's Republic of China (2016—2020). China, State Council, CPC Central Committee, 2016; National Innovation-Driven Development Strategy Outline "Three-step to build the world's science and technology innovation in 2050". Science and Technology Department of the People's Republic of China, 2016; Healthy China 2030 Plan. China, State Council, CPC Central Committee, 2016.</p> | | |

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.315.592:621.382

DOI: 10.17587/nmst.21.702-708

Ю. В. Федоров, гл. констр., зам. директора, **А. С. Бугаев**, гл. технолог, зам. директора,
Д. Л. Гнатюк, канд. техн. наук, зав. лаб., **А. Ю. Павлов**, канд. техн. наук, зав. лаб.,
О. С. Матвеев, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **В. Ю. Павлов**, мл. науч. сотр.,
Д. Н. Слаповский, мл. науч. сотр., **К. Н. Томош**, мл. науч. сотр., **Е. Н. Енюшкина**, гл. спец.,
Р. Р. Галиев, науч. сотр., **М. В. Майтама**, мл. науч. сотр., **А. В. Зуев**, науч. сотр.,
Д. В. Крапухин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **С. А. Гамкрелидзе**, д-р техн. наук, директор,
Б. Г. Путинцев, аспирант, **П. П. Мальцев**, д-р техн. наук, науч. руководитель института,
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук
(ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

МАКЕТИРОВАНИЕ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ 5-МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН НА БАЗЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ

Поступила в редакцию 16.09.2019

Разработана технология изготовления монолитных интегральных схем (МИС) на основе нитрида галлия для миллиметрового диапазона длин волн с невжигаемыми омическими контактами и обеспечением общей земли с лицевой стороны кристалла. По данной технологии впервые в России разработаны и изготовлены ряд МИС различного функционального назначения диапазона длин волн 5 мм, которые могут быть использованы для создания высокоскоростных широкополосных систем связи. С использованием разработанных МИС созданы макеты приемо-передающих устройств 5-миллиметрового диапазона длин волн.

Ключевые слова: нитрид галлия, монолитная интегральная схема, преобразователь сигнала, системы связи

Введение

Диапазон частот 57...66 ГГц (5-миллиметровый диапазон длин волн) является на сегодняшний день свободным широкополосным ресурсом. Это позволяет реализовать в нем широкополосные высокоскоростные системы связи со скоростью передачи данных до 10 Гбит/с. Сильное поглощение электромагнитных волн атмосферным кислородом — до 15 дБ/км в данном диапазоне не позволяет организовать связь на большие расстояния, но устраняет проблему интерференции между сигналами близко расположенных сетей. Это также дает

возможность создавать каналы спутниковой связи, защищенные от помех и перехвата информации со стороны Земли. Малый размер длины волны в 5-миллиметровом диапазоне позволяет встроить в кристалл с микросхемой как отдельные антенны, так и небольшие антенные решетки. Создание отечественной элементной базы 5-миллиметрового диапазона длин волн на нитриде галлия открывает возможности по реализации малогабаритных высокотемпературных и радиационно-стойких широкополосных сверхскоростных систем связи различного назначения.

Монолитные интегральные схемы миллиметрового диапазона длин волн

В результате выполнения ряда НИР и ОКР в ИСЧВПЭ РАН была разработана и внедрена технология изготовления МИС на основе нитрида галлия для миллиметрового диапазона длин волн с невжигаемыми омическими контактами и обеспечением общей земли с лицевой стороны кристалла с использованием отечественных гетероструктур AlGaN/AlN/GaN на подложках сапфира и карбида кремния производства ЗАО "Элма-Малахит". Использование невжигаемых омических контактов позволило снизить удельное контактное сопротивление к $Al_xGa_{1-x}N$ с 0,5...0,6 Ом · мм до 0,15...0,2 Ом · мм и сохранить высококачественный рельеф контактов для последующих технологических операций. Формирование металлизации земли с лицевой стороны кристалла обеспечило надежное заземление элементов МИС без необходимости травления сквозных отверстий в сапфире или карбиде кремния [1].

На сегодняшний день ИСЧВПЭ РАН завершил опытно-конструкторскую работу по созданию комплекта бескорпусных монолитных интегральных схем 5-миллиметрового диапазона длин волн по заказу Минпромторга России. Конструктивно все МИС выполнены в виде кристаллов на основе нитрида галлия на подложке сапфира в бескорпусном исполнении. МИС прошли необходимые испытания на надежность и безотказность и были включены в серию 5411.

По результатам выполнения ОКР были утверждены ТУ на следующие монолитные интегральные схемы [2]:

— маломощный усилитель (МШУ) 5411УВ01Н без антенны и МШУ 5411УВ01АН, интегрированный с антенной на одном кристалле (АЕНВ.431130.293ТУ);

— усилитель мощности (УМ) 5411УВ02Н без антенны и УМ 5411УВ02АН, интегрированный с антенной на одном кристалле (АЕНВ.431120.294ТУ);

— преобразователь сигнала приемный 5411НС01Н (АЕНВ.431320.295ТУ), в его составе ГУН, балансный смеситель и УПЧ.

Помимо указанных выше МИС были реализованы в виде отдельных кристаллов МИС ГУН, балансный смеситель, антенный элемент, а также приемно-передающий преобразователь сигнала.

МИС МШУ имеет коэффициент передачи не менее 15 дБ при коэффициенте шума около 6 дБ и токе потребления менее 100 мА. В режиме большого сигнала в импульсном режиме по питанию выходная мощность МИС УМ достигает 100 мВт при токе потребления до 200 мА. Линейная выходная

мощность равна 30...50 мВт. Выходная мощность МИС ГУН в непрерывном режиме равна 30...40 мВт при напряжении питания 10 В. Линейный диапазон перестроения частоты — не менее 2 ГГц. Спектральная плотность фазовых шумов при отстройке 100 кГц составляет –60 дБн/Гц, а при отстройке 1 МГц равна –90 дБн/Гц. Приемный и приемно-передающий преобразователи сигнала имеют коэффициент преобразования не менее 0 дБ (типично 5...10 дБ) при напряжении питания 10 В и токе потребления менее 150 мА. Выходная мощность, подводимая к антенне, составляет не менее 10 мВт в непрерывном режиме.

Экспериментальные результаты

Возможные варианты использования комплекта 5411 и других МИС 5-миллиметрового диапазона длин волн для создания перспективных систем связи схематично показаны на рис. 1 (см. третью сторону обложки).

Совместное использование МИС ГУН и антенного элемента позволяет реализовать функцию передачи радиосигнала, тогда как функцию приема обеспечивают антенный элемент и преобразователь 5411НС01Н. Возможна также реализация с помощью МИС приемно-передающего преобразователя сигнала, антенного элемента и маломощного усилителя 5411УВ01АН.

В целях проверки возможности применения МИС серии 5411 для практической реализации элементов приемно-передающих модулей 5-миллиметрового диапазона длин волн были изготовлены макеты приемника и передатчика. Макеты выполнены на печатной плате из материала Rogers 4350 размером 24 × 26 мм и представляют собой гибридные сборки, содержащие бескорпусные МИС. В состав передатчика входят МИС антенного элемента и МИС ГУН. В состав приемника входят МИС антенного элемента и МИС приемного преобразователя сигнала 5411НС01Н. Кристаллы монтировали на платы методом приклейки и разварки (рис. 2, см. третью сторону обложки).

Полученные макеты были протестированы совместно, имитируя радиолинию связи, а именно: сигнал с макета передатчика принимал макет приемника и после преобразования на промежуточную частоту (ПЧ) его фиксировал анализатор спектра. В данном эксперименте протяженность радиолинии была ограничена 120 см, что было обусловлено размером лабораторного стола. При этом анализатор спектра детектировал сигнал с мощностью –54 дБм (рис. 3, см. третью сторону обложки). Было также проконтролировано влияние напряжения управления ГУН обоих макетов

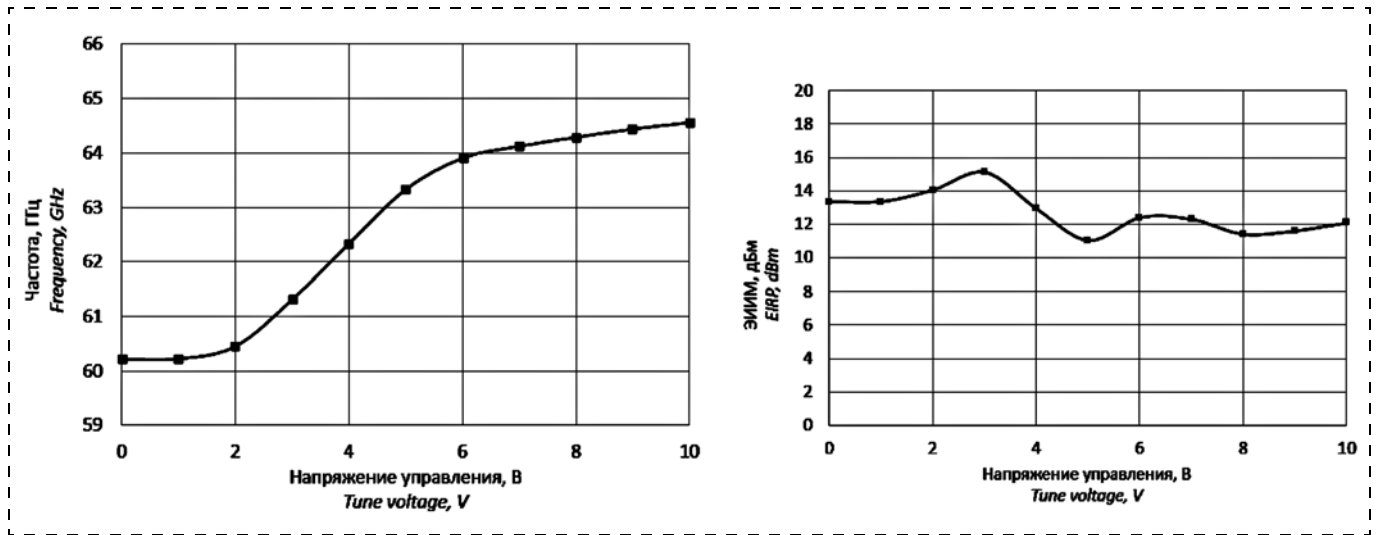


Рис. 4. Измеренные зависимости диапазона перестроения и ЭИИМ макета передатчика
 Fig. 4. The measured dependences of the tuning range and EIRP of the transmitter prototype

на частоту выходного сигнала ПЧ. Эффективная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) передающего макета по результатам измерений составила 12...15 дБм. Измерения ЭИИМ были проведены в лабораторных условиях вне безэховой камеры. Зависимости диапазона перестроения и ЭИИМ макета передатчика в гибридном исполнении от напряжения управления приведены на рис. 4.

Результаты эксперимента наглядно демонстрируют не только работоспособность полученных макетов, но и возможность применения в 5-миллиметровом диапазоне длин волн широко распространенного на отечественных предприятиях способа монтажа кристаллов, что немаловажно для производства.

По рекомендациям Международного союза электросвязи ITU-R P.525-2 ослабление в свободном пространстве между изотропными антеннами L_{bf} на частоте f и расстоянии d целесообразно рассчитывать следующим образом:

$$L_{bf} = 32,4 + 20\lg(f) + 20\lg(d). \quad (1)$$

Согласно выражению (1) ослабление в свободном пространстве на частоте 65 ГГц составляет 70 дБ на расстоянии 120 см, 82 дБ на расстоянии 5 м и 88 дБ на расстоянии 10 м. Это позволяет дать грубую оценку предельной дальности связи между рассматриваемыми макетами в 5...10 м. Такая дальность является вполне достаточной, например, в системах связи интернета "вещей".

Продолжением данной работы стало объединение преобразователя сигнала на одном кристалле вместе с приемной и передающей антеннами. Преобразователь сигнала состоит из ГУН, балансного смесителя и МШУ на входе высокой частоты (ВЧ).

Для приема и передачи используется один и тот же ГУН, сигнал с которого через делитель поступает на передающую антенну и на гетеродинный вход смесителя. При проектировании были использованы зарекомендовавшие себя схемотехнические и топологические решения серии 5411. Результатом данной работы стали МИС, показанные на рис. 5. Размер кристалла составляет $4,0 \times 2,4$ мм. Данные МИС были также успешно опробованы в составе макетов однокристалльных приемо-передающих устройств, показанных на рис. 6. Макеты выполнены на печатной плате из материала Rogers 4350 размером 35×25 мм. Монтаж кристаллов осуществлен методом приклейки и разварки. ЭИИМ макетов достигает 12 дБм.

Насколько нам известно, преобразователи сигнала 5-миллиметрового диапазона длин волн со встроенными антеннами на гетероструктурах нит-

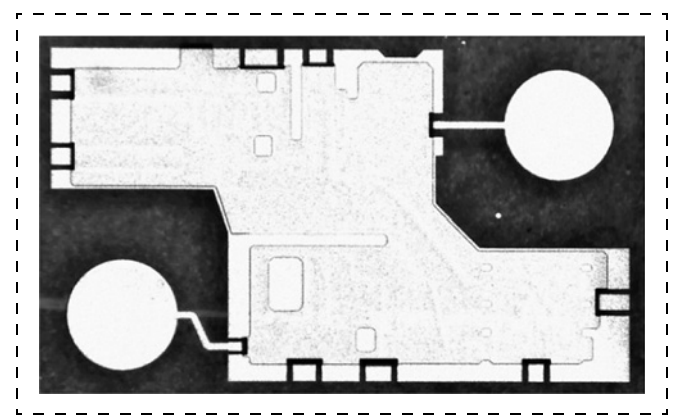


Рис. 5. Фотография кристалла приемо-передающего преобразователя сигнала со встроенными антеннами
 Fig. 5. Photo of the chip of transmit-receive signal converter with built-in antennas

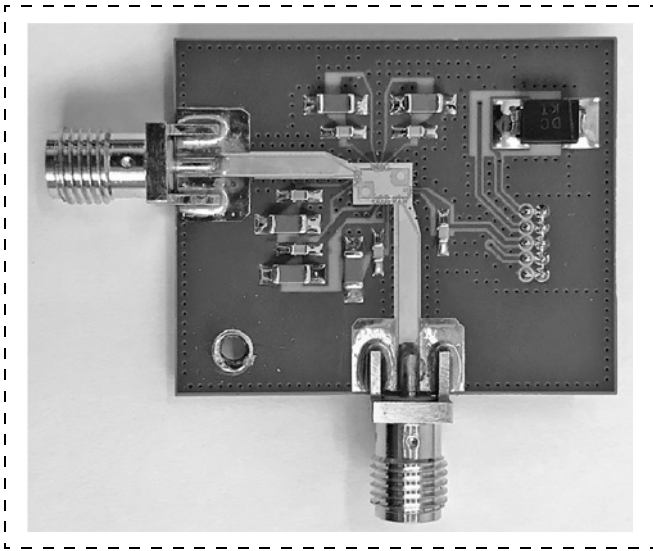


Рис. 6. Фотография макета однокристального приемо-передающего устройства

Fig. 6. Photo of the single-chip transmit-recvie prototype

рида галлия на сапфире были изготовлены впервые в мире. За рубежом работы по созданию приемо-передающих модулей (ППМ) 5-миллиметрового диапазона длин волн выполняются на основе таких материалов, как Si, SiGe, GaAs [3–9]. По результатам работы было получено пять свидетельств о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы [10–14].

Заключение

В ходе работы на основе монолитных интегральных схем 5-миллиметрового диапазона длин волн производства ИСВЧПЭ РАН были разработаны, изготовлены и исследованы макеты узлов приемо-передающих модулей. Работоспособность макетов подтверждена экспериментально. Зафиксировано значение эффективной изотропно излучаемой мощности на уровне до +15 дБм. Предельная дальность связи между исследованными макетами оценивается в 5...10 м. Рассмотренные монолитные интегральные схемы могут послужить основой для создания перспективных радиационно стойких широкополосных сверхскоростных систем связи.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-07-00683 А.

Список литературы

1. Федоров Ю. В., Бугаев А. С., Павлов А. Ю. и др. Технология изготовления и разработки монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 5. С. 273–293.
2. Справочный лист комплекта бескорпусных МИС серии 5411 на нитриде галлия для диапазона частот 57–64 ГГц. URL: <http://new.isvch.ru/razrab/> (дата обращения: 27.07.2019).
3. 60 GHz Millimeterwave Transmitter, 57 GHz to 64 GHz, Data Sheet HMC6300. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/HMC6300.pdf> (дата обращения: 26.03.2019).
4. 60 GHz Millimeterwave Receiver, 57 GHz to 64 GHz, Data Sheet HMC6301. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/HMC6301.pdf> (дата обращения: 26.03.2019).
5. Шахнович И. Компания Infineon technologies от сенсоров до решений для опорных сетей в E- и V-диапазонах // Электроника: наука, технология, бизнес. 2016. № 5 (00155). С. 70–75.
6. Системы на кристалле со встроенными антеннами на наногетероструктурах АЗВ5 / Под. ред. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2018. 528 с.
7. Marcu C., Chowdhury D., Thakkar C. et al. A 90 nm CMOS Low-Power 60 GHz Transceiver with Integrated Baseband Circuitry // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2009. Vol. 44, N. 12. P. 3434–3447.
8. Zevallos Luna J. A., Siligaris A., Pujol C. et al. A Packaged 60 GHz Low-Power Transceiver with Integrated Antennas for Short-Range Communications // IEEE Radio and Wireless Symposium. 2013. P. 355–357.
9. Zevallos Luna J. A., Dusopt L., Siligaris A. Packaged Transceiver with On-Chip Integrated Antenna and Planar Discrete Lens for UWB Millimeter-Wave Communications // IEEE International Conference on Ultra-WideBand. 2014. P. 374–378.
10. Топология ИМС "Интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 57–64 ГГц" // Свидетельство о государственной регистрации № 2013630159 от 06.11.2013 / Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. и др.
11. Топология ИМС "Преобразователь сигнала для диапазона 57–64 ГГц". Свидетельство о государственной регистрации № 2013630171 от 05.12.2013 / Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. и др.
12. Топология ИМС "Интегральный антенный элемент со встроенным усилителем мощности для диапазона 57–64 ГГц". Свидетельство о государственной регистрации № 2015630131 от 02.12.2015 / Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. и др.
13. Топология ИМС "Интегрированный приемо-передающий модуль для диапазона частот 57–64 ГГц". Свидетельство о государственной регистрации № 2015630131 от 12.07.2016 / Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. и др.
14. Топология ИМС "Усилитель промежуточной частоты". Свидетельство о государственной регистрации № 2017630087 от 05.03.2017 / Федоров Ю. В., Зуев А. В.

Yu. V. Fedorov, Chief Designer, Deputy Director, **A. S. Bugayev**, Chief Technologist, Deputy Director, **D. L. Gnatyuk**, Ph. D., Head of Laboratory, **A. Yu. Pavlov**, Ph. D., Head of Laboratory, **O. S. Matveyenko**, Ph. D., Senior Researcher, **V. Yu. Pavlov**, Junior Researcher, **D. N. Slapovsky**, Junior Researcher, **K. N. Tomosh**, Junior Researcher, **E. N. Enyushkina**, Chief Specialist, **R. R. Galiyev**, Researcher, **M. V. Maytama**, Junior Researcher, **A. V. Zuev**, Researcher, **D. V. Krapukhin**, Ph. D., Senior Researcher, **S. A. Gamkrelidze**, D. Sc., Director, **B. G. Putintsev**, Postgraduate Student, **P. P. Maltsev**, D. Sc., Scientific Head of the Institute, Institute of Ultra-High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, 117105, Russian Federation

Corresponding author:

Gnatyuk Dmitriy L., Ph. D., Head of Laboratory, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, 117105, Russian Federation, e-mail: dgnatyuk@yandex.ru

Prototyping of V-band Transmit-Receive Modules on the Basis of the Domestic Monolithic Integrated Circuits on Gallium Nitride

Received on September 16, 2019

Accepted on September 30, 2019

A gallium nitride based technology with non-alloyed ohmic contacts and face-side ground metal was developed and implemented. Using this technology, several V-band MMICs of different functionality have been designed and manufactured on Al_2O_3 substrates for the first time in Russian Federation. Among them there are LNA, PA, VCO, mixer, downconverter (consisting of VCO, mixer and IF amplifier), as well as transmit/receive converter with on-chip transmit and receive antennas. Using these MMICs some working prototypes of transmit, receive and transmit/receive units were assembled and evaluated. "Hybrid"-style prototypes consist of patch antenna chip with either VCO chip (TX) or downconverter chip (RX). "Monolithic"-style prototypes consist of single-chip transmit/receive converter with two on-chip antennas. Both types of prototypes were assembled on PCBs with size as much as 24×26 mm and 35×25 mm. Laboratory tests demonstrated operability of both kinds of prototypes. Measured EIRP of prototypes reached 15 dBm. Length of radio link between prototypes during tests was limited to 120 cm due to free space availability and convenience to place prototypes. Maximum radio link length for given prototypes is estimated to be no more than 5–10 meters. These MMICs can become a basis to construct wide-band high-speed communication systems.

As far as authors know this is the first time AlGaIn/GaN/ Al_2O_3 V-band transmit-receive single chip MMIC with on-chip antennas is reported.

Keywords: gallium nitride, monolithic integrated circuit, signal converter, communication systems

For citation:

Fedorov Yu. V., Bugayev A. S., Gnatyuk D. L., Pavlov A. Yu., Matveyenko O. S., Pavlov V. Yu., Slapovsky D. N., Tomosh K. N., Enyushkina E. N., Galiyev R. R., Maytama M. V., Zuev A. V., Krapukhin D. V., Gamkrelidze S. A., Putintsev B. G., Maltsev P. P. Prototyping of V-band Transmit-Receive Modules on the Basis of the Domestic Monolithic Integrated Circuits on Gallium Nitride, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 12, pp. 702–708.

DOI: 10.17587/nmst.21.702-708

Introduction

The frequency band of 57...66 GHz (5-millimeter band of the wavelengths) is a free broadband resource today. It allows to realize in it the broadband high-speed communication systems with the data transmission speed up to 10 Gbit/s. A strong absorption of the electromagnetic waves in the atmospheric oxygen — up to 15 dB/km in this range does not allow to organize communication at long distances, but it solves the problem of interference between the signals from the

closely located networks. It also makes it possible to create satellite communication channels protected from jamming and interception of information from the Earth. A small size of the wavelength in the 5-millimeter range allows to integrate into a MMIC chip either single antenna or small antenna array. Development of domestic V-band gallium nitride components opens opportunities for realization of small-sized high-temperature and radiation-resistant broadband superfast various-purpose communication systems.

Monolithic integrated circuits of the millimeter range of wavelengths

As a result of research and development works ISChVPE of RAS developed and introduced techniques for manufacturing of MMIC on the basis of gallium nitride for the millimeter range of the wavelengths with non-alloyed ohmic contacts and face-side ground metal with the use of the domestic HEMT heterostructures of AlGa_N/AlN/GaN on the substrates of sapphire and carbide of silicon from Elma-Malakhit Co. Use of non-alloyed ohmic contacts allowed us to reduce the specific contact resistance to Al_xGa_{1-x}N from 0.5...0.6 Ω·mm down to 0.15...0.2 Ω·mm and preserve high-quality relief of the contacts for the subsequent technological operations. Formation of face-side ground metallization gave us a chance to ensure a reliable grounding for the MMIC elements without a necessity for etching of via holes in the sapphire or carbide of silicon [1].

Now ISVChPE of RAS has already finished development of a set of packageless monolithic integrated circuits of the 5-millimeter range of wavelengths to the order of Minpromtorg of Russia. Structurally all MIC are made in the form of dies on the basis of gallium nitride on a sapphire substrate in the a packageless version. MMIC have passed the necessary tests for a fail-safe and non-failure operation and were included in the series of 5411.

By the results of the research and development works the following technical requirements to the monolithic integrated circuits were approved [2]:

— 5411UV01N low-noise amplifier (LNA) without antenna and 5411UV01AN LNA with on-chip antenna (AEHB.431130.293TY);

— 5411UV02N power amplifier (PA) without antenna and 5411UV02AN PA with on-chip antenna (AENV.431120.294TU);

— 5411NS01N (AENV.431320.295TU) receiving signal converter composed of VCO, balanced mixer, IFA.

Besides the MMICs mentioned above, the VCO balanced mixer, an antenna element and also the transmit-receive signal converter MMICs were realized in the form of separate dies.

LNA has a transmission coefficient not less than 15 dB with the noise figure of about 6 dB and current consumption less than 100 mA. In large signal mode with pulsed power supply the output power of PA reaches 100 mW at the consumption current up to 200 mA. The linear output power equals to 30...50 mW. The output power of VCO in the continuous mode is equal to 30...40 mW at the supply voltage of 10 V. The linear tuning range is not less than 2 GHz. The spectral density of the phase noise at 100 kHz offset is 60 dBc/Hz,

equals to 90 dBc/Hz at 1 MHz offset. The receive and transmit-receive signal converters have the conversion gain not less than 0 dB (5...10 dB typically) at the supply voltage of 10 V and the consumption current less than 150 mA. The output power delivered to the antenna is not less than 10 mW in the continuous mode.

Experimental results

Possible ways for use of 5411 set and other V-band MMICs for creation of perspective communication systems are schematically presented in fig. 1 (see the 3-rd side of cover).

Simultaneous use of VCO MMIC and antenna element allows us to realize the function of transmission of a radio signal, whereas the function of receiving is ensured by the antenna element and 5411NS01N converter. Combined use of a transmit-receive signal converter MMIC, an antenna element and 5411UV01AN low-noise amplifier is also possible.

For checking of the feasibility of application of MIC of 5411 series for a practical realization of the elements of V-band transmit-receive modules prototypes of the receiver and of the transmitter were manufactured. They were assembled on Rogers 4350 printed circuit board, with size of 24 × 26 mm, and they were hybrid assemblies containing packageless MMICs. The transmitter incorporated the antenna element and VCO. The receiver consisted of the antenna element and 5411NS01N receiving signal converter. The dies were mounted on the boards by the method of gluing and wire bonding (fig. 2, see the 3-rd side of cover).

The manufactured prototypes were tested jointly, imitating a radio communication line, namely: a signal from the transmitter prototype was received by the receiver prototype and after its conversion to the intermediate frequency (IF) it was detected by a spectrum analyzer. In this experiment the length of the radio line was limited to 120 cm because of the size of the laboratory table. In this case the spectrum analyzer detected a signal with a power of -54 dBm (fig. 3). The influence of the tuning voltage of VCO of both prototypes on the frequency of the output IF signal was also checked. The measured effective isotropic radiated power (EIRP) of the transmitting prototype was 12...15 dBm. Measurements of EIRP were taken in laboratory conditions without anechoic camera. The dependences of the tuning range and EIRP of the transmitter prototype in its hybrid version are presented in fig. 4.

The results of the experiment demonstrate clearly not only operability of the received models, but also appropriateness for V-band of die mounting method, widespread at the domestic enterprises, which is important for the production.

According to ITU-R P.525-2 recommendations of the International Telecommunication Union it is advisable to calculate attenuation in the free space L_{bf} between isotropic antennas at frequency f and distance d in the following way:

$$L_{bf} = 32,4 + 20\lg(f) + 20\lg(d). \quad (1)$$

According to the expression (1) attenuation in the free space at frequency of 65 GHz is 70 dB at the distance of 120 cm, 82 dB — at the distance of 5 m and 88 dB — at the distance of 10 m. This allows us to make a rough estimation of the limit range of communication between the considered prototypes as 5...10 m. Such a range is quite sufficient, for example, for IoT communication systems.

This work was continued as signal converter with built-in receiving and transmitting antennas. The signal converter consists of VCO, a balanced mixer and LNA at the input of high frequency (HF). For receiving and transmitting the same VCO is used, a signal from which through the divider comes to the transmitting antenna and the heterodyne input of the mixer. During designing the proved circuitry and topological solutions of 5411 series were used. The result of this work were shown in fig. 5. The chip size is 4.0×2.4 mm. These MMICs were also successfully tested as prototypes of the single-chip transmit-receive devices shown in fig. 6. The prototypes were assembled on Rogers 4350 printed circuit board, with the size of 35×25 mm. The dies were mounted by the method of gluing and wire bonding. EIRP of the prototypes reached 12 dBm.

As far as we know, V-band signal converters with the built-in antennas on gallium nitride heterostructures on sapphire were manufactured for the first time in the world. Abroad the works on development of V-band transmit-receive modules (TRM) are conducted on the basis of such materials as Si, SiGe, and GaAs [3–9]. As a result of the work five certificates were received on the state registration of the topology of an integrated circuit [10–14].

Conclusion

During the work, on the basis of V-band monolithic integrated circuits ISVChPE, RAS, prototypes of the parts of transmit-receive modules were developed, manufactured and investigated. Operability of the prototypes was confirmed experimentally. The measured value of the effective isotropic radiated power was up to +15 dBm. The limit range of communication between the studied prototypes was estimated as 5...10 m. The considered monolithic integrated circuits can serve as a basis for development of perspective radiation-resistant broadband superfast communication systems.

References

1. Fedorov Yu. V., Bugaev A. S., Pavlov A. Yu. et al. *Texnologiya izgotovleniya i razrabotki monolitnykh integral'nykh skhem na osnove nitrida galliya, Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 5, pp. 273–293 (in Russian).
2. **Spravochnyj list** komplekta beskorpusnykh MIS serii 5411 na nitride galliya dlya diapazona chastot 57–64 GHz. URL: <http://new.isvch.ru/razrab>. Accessed July 27, 2019.
3. **60 GHz Millimeterwave** Transmitter, 57 GHz to 64 GHz, Data Sheet HMC6300. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/HMC6300.pdf>. Accessed March 26, 2019.
4. **60 GHz Millimeterwave** Receiver, 57 GHz to 64 GHz, Data Sheet HMC6301. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/HMC6301.pdf>. Accessed March 26, 2019.
5. **Shakhnovich I.** Kompaniya Infineon technologies ot sensorov do reshenij dlya opornyx setej v E- i V-diapazonakh, *E'lektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2016, no. 5 (00155), pp. 70–75 (in Russian).
6. **Sistemj** na kristalle so vstroennyjmi antennami na nanogeterostrukturah A3V5 / ed. P. P. Mal'tsev. Moscow, Tekhnosfera, 2018, 528 p. (in Russian).
7. **Marcu C., Chowdhury D., Thakkar C.** et al. A 90 nm CMOS Low-Power 60 GHz Transceiver with Integrated Baseband Circuitry, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2009, vol. 44, no. 12, pp. 3434–3447.
8. **Zevallos Luna J. A., Siligaris A., Pujol C.** et al. A Packaged 60 GHz Low-Power Transceiver with Integrated Antennas for Short-Range Communications, *IEEE Radio and Wireless Symposium*, 2013, pp. 355–357.
9. **Zevallos Luna J. A., Dussopt L., Siligaris A.** Packaged Transceiver with On-Chip Integrated Antenna and Planar Discrete Lens for UWB Millimeter-Wave Communications, *IEEE International Conference on Ultra-WideBand (ICUWB)*, 2014, pp. 374–378.
10. **Topologiya IMS** "Integral'nyj antennoj element so vstroennyjmi maloshumyashhim usilitelem dlya diapazona 57–64 GHz", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2013630159 ot 06.11.2013 / Mal'tsev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. et al. (in Russian).
11. **Topologiya IMS** "Preobrazovatel' signala dlya diapazona 57–64 GHz", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2013630171 ot 05.12.2013 / Mal'tsev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. et al. (in Russian).
12. **Topologiya IMS** "Integral'nyj antennoj element so vstroennyjmi usilitelem moshhnosti dlya diapazona 57–64 GHz", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2015630131 ot 02.12.2015 / Mal'tsev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. et al. (in Russian).
13. **Topologiya IMS** "Integrirovannyj priemo-peredayushhij modul' dlya diapazona chastot 57–64 GHz", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2015630131 ot 12.07.2016 / Mal'tsev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. et al. (in Russian).
14. **Topologiya IMS** "Usilitel' promezhutochnoj chastoty", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2017630087 ot 05.03.2017 / Fedorov Yu. V., Zuev A. V. (in Russian).

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

УДК 661.665.1

DOI: 10.17587/nmst.21.709-720

С. В. Редькин, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., e-mail: sergeiredckin@yandex.ru,
Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной
полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)

КУБИЧЕСКИЙ КАРБИД КРЕМНИЯ НА КРЕМНИИ ДЛЯ СВЧ, СИЛОВОЙ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Поступила в редакцию 19.09.2019

Проведены работы по созданию базовой технологии формирования кубического карбида кремния (3C-SiC) на пластинах кремния (Si) в плазме высокочастотных, высокочастотных индукционных и сверхвысокочастотных разрядов при низком давлении. Установлено, что процесс формирования слоев 3C-SiC на Si должен быть многостадийным, но интегрированным, т. е. одна стадия должна следовать за другой без развакуумирования рабочей камеры, только изменением режимов, газовых сред и подачи электрического смещения. Предложены технологические смеси: $\text{SiF}_4 + \text{CF}_4 + \text{Ar}$; $\text{SiF}_4 + \text{CH}_4 + \text{Ar}$. Установлено, что четырехчасовая обработка в ВЧИ разряде позволяет модифицировать кремневую (Si) пластину толщиной 375 мкм в карбид кремния (3C-SiC) на всю толщину. Следует отметить, что при этом пластина утонялась на максимальную толщину 120 мкм. В предлагаемых плазменных методах формирования 3C-SiC на Si температуры не превышали 800 °С. Слои 3C-SiC могут быть использованы для создания мощных нитридных приборов в СВЧ диапазоне, силовых приборов и других изделий электронной техники.

Ключевые слова: кубический карбид кремния, кремний, PECVD процесс, карбидизация, травление, очистка, слой, пластина

Введение

В настоящее время актуальны вопросы широкого использования в промышленности широкозонных полупроводников, одним из которых является карбид кремния, но применяемые сегодня гексагональные полиморфы (4H и 6H) дороги. Поэтому выращивание на кремнии кубического полиморфа 3C-SiC значительно снижает стоимость таких пластин — 3C-SiC на Si, да он и более технологичен — не требуется менять существующие маршруты изготовления приборов, а необходимо только добавить в начале маршрута одну операцию — выращивание 3C-SiC слоя требуемой толщины, а на выходе — качественно другие приборы — термостойкие, радиационно устойчивые. В настоящей работе сделана попытка разработки принципиально новой плазменной технологии формирования слоев 3C-SiC на Si в отличие от термических методов. Нам удалось сформировать слои 3C-SiC при температурах, не превышающих 800 °С и ниже —

подогрев осуществляется самой плазмой и отчасти СВЧ полем. Нами рассмотрены плазмы трех разрядов — традиционного высокочастотного (ВЧ) разряда в диодной системе (частота 13,56 МГц), высокочастотного индукционного (ВЧИ), комбинации ВЧ диодного и ВЧ индукционного, а также сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда (2,45 ГГц) с магнитным полем (ЭЦР — электронный циклотронный резонанс). Ниже мы рассмотрим некоторые особенности плазмы этих разрядов и полученные экспериментальные результаты.

Освоение широкозонных материалов, прежде всего карбида кремния (далее — SiC) и нитридов третьей группы, становится одним из главных направлений развития современной полупроводниковой электроники.

Способы формирования SiC на Si

На основе анализа прогнозов ведущих специалистов в области полупроводниковой электроники

ки, презентаций ведущих фирм на конференциях и анализа журнальных статей сделан общепризнанный вывод о том, что потенциальные возможности полупроводниковых материалов — кремния и арсенида галлия практически полностью исчерпаны. Прогресс в области разработок приборов нового поколения связан с совершенствованием технологии приборов на широкозонных полупроводниках (SiC, GaN, алмаз и др.). С технологическим освоением данного класса материалов связаны ожидания в создании нового поколения приборов для высокотемпературной силовой и высокочастотной электроники, продвижение полупроводниковой оптоэлектроники в коротковолновую часть видимого и ближнего ультрафиолетового диапазонов спектра.

Уникальные свойства SiC:

- большая ширина запрещенной зоны (2,3...3,3 эВ для различных политипных форм);
- чрезвычайно высокое критическое поле лавинного пробоя (2...5 МВ/см);
- теплопроводность ($\lambda_{SiC} = 3...5$ Вт/(см·К)), превосходящая при комнатной температуре теплопроводность меди.

Все это ставит SiC в ряд наиболее перспективных материалов высокотемпературной, радиационно стойкой и силовой электроники [1].

Подложки SiC в мировой практике используют в основном при разработке отдельных приборов военного и специального назначения, где предъявляются особо жесткие требования в сочетании с высоким быстродействием. Массовое применение карбидокремниевых изделий электронной компонентной базы (далее ЭКБ) сдерживается высокой стоимостью подложек SiC. Поэтому разработка путей снижения стоимости ЭКБ на основе SiC является актуальной проблемой. В России эта проблема стоит наиболее остро, что обусловлено необходимостью импортозамещения дорогих подложек фирмы Cree (США), на поставку которых в Российскую Федерацию наложено эмбарго. Следовательно, разработка экономически эффективной технологии формирования структур "карбид кремния на кремнии" является перспективным решением указанной проблемы, появятся технико-экономические условия для проведения масштабных разработок радиационно стойких изделий СВЧ ЭКБ и их внедрения в перспективные образцы изделий различного назначения.

Существует много различных способов формирования SiC на Si, в основном это политип 3C-SiC как на подслоях, так и без подслоев с использованием различных газовых систем в качестве источников Si и C, с применением в качестве источника Si самой подложки. Например, в Физико-тех-

ническом институте им. А. Ф. Иоффе разработан безбуферный метод выращивания монокристаллического кубического SiC на Si подложках из моносилана и трихлорэтилена при Si/C = 1 на стандартном оборудовании с кварцевой оснасткой для получения эпитаксиальных слоев кремния [2], т. е. в среде $SiH_4 + C_2HCl_3 + H_2$ при температуре 1050...1250 °С. Процесс многостадийный — предусматривающий прогрев Si-подложки в атмосфере водорода при атмосферном давлении в течение 10 мин. Этому предшествовала еще и перекисно-аммиачная отмычка и продувка водородом в течение 1 ч при расходе последнего 76 л/мин. После 10 мин выдерживания в потоке водорода проводили операцию травления в хлористом водороде при температуре 1000 °С. Затем прекращали подачу HCl, повышали температуру до 1050 °С и только после этого подавали моносилан (0,03 л/мин) и поток трихлорэтилена (скорость потока водорода через барботер с трихлорэтиленом была 0,3 л/мин). В качестве газа-носителя реагентов использовали водород (скорость потока 87 л/мин). Как видим, все довольно сложно.

Выращивание 3C-SiC на Si проводили на пластине КДБ-10 с ориентацией (100) и (111).

Мы так подробно описали этот способ только потому, что в этой работе предложен (скорее всего впервые, автор не располагает более ранней информацией) интегрированный способ выращивания слоев 3C-SiC на Si, состоящий из нескольких стадий. Это перекликается с нашими экспериментами, о которых пойдет речь ниже.

Следует отметить интересный способ самоорганизующейся эндотакции моно3C-SiC на Si подложке [3]. Процесс проводят в ВЧ поле в диапазоне температур 1360...1380 °С в потоке водорода (H_2) 0,3...0,5 л/мин с зоной из графита, где образуются летучие соединения CH_x , которые переносятся на Si-подложку. Источником Si является сама подложка. Это все безбуферные способы. Необходимо рассмотреть и методы с формированием промежуточного пористого слоя для минимизации механических напряжений между слоем 3C-SiC и Si, возникающих вследствие рассогласования периодов решеток (~20 %) и различия температурных коэффициентов линейного расширения (~8 %) [4]. В этой работе рассматривали три типа буферных слоев:

- карбидизация поверхности кремния в углеродосодержащей плазме при температурах порядка 1300 °С;
 - нанопористый кремний;
 - карбидизированный нанопористый кремний.
- Автор работы утверждает, что минимальный уровень механических напряжений в структурах

3C-SiC/Si может быть достигнут при использовании подложек с буферным слоем из нанопористого кремния при проведении процесса в интервале температур 1350...1370 °С.

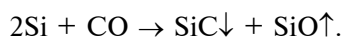
Для создания гетероструктур *n*-3C-SiC/*p*-Si с улучшенными электрофизическими характеристиками необходимо использовать в качестве буферного слоя карбидизированный нанопористый кремний [4].

Эпитаксиальные слои 3C-SiC формировались из реакционных газов (5 %-ный раствор C₃H₈ (пропан) в H₂) и (5 %-ный раствор SiH₄ (моносилан) в Ar), в качестве транспортного газа использовали водород (H₂), прошедший финишную очистку. Раздельная подача моносилана и пропана позволяла варьировать соотношение Si/C в газовой фазе.

Подчеркнем, что рост 3C-SiC осуществлялся при атмосферном давлении в диапазоне температур 1100...1390 °С, были получены слои 3C-SiC на Si толщиной 0,5...3,0 мкм без включений других поли типов [4].

Аналогичные газовые смеси для роста 3C-SiC были использованы в работе [5].

В работах [6] и [7] описан способ формирования промежуточного пористого слоя в процессе роста 3C-SiC на Si. Процесс эпитаксиального роста проводился между Si пластины и газовой фазой (CO) при нагревании до 1100...1400 °С и давлении $P = 10...300$ Па. Процесс протекает по следующей реакции:



В этой реакции одна молекула SiC образуется вместо двух атомов Si, так как один атом Si удаляется из системы вместе с газом SiO, таким обра-

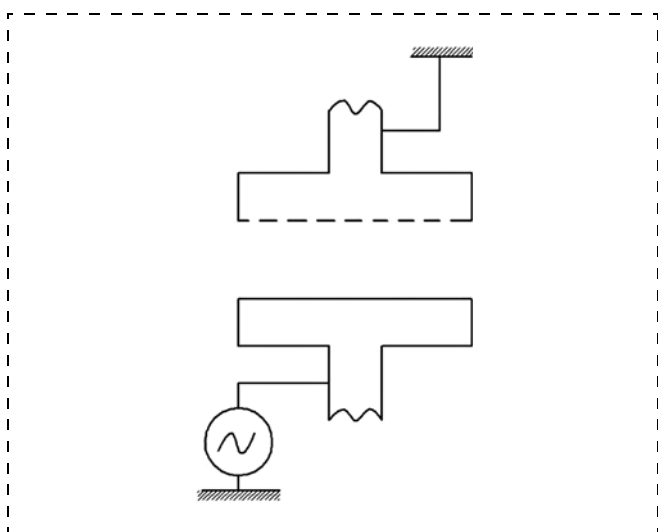


Рис. 1. Схема ВЧ макетной установки
Fig. 1. Circuit of the HF model installation

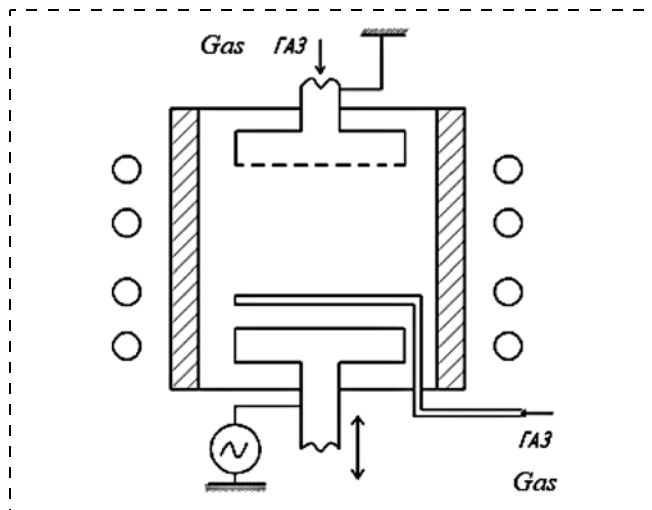


Рис. 2. Схема ВЧИ и ВЧИ + ВЧ макетной установки
Fig. 2. Circuit of the HFI and HFI + HF model installations

зом образуются поры в Si пластине. Метод хорош всем, только протекает при достаточно высоких температурах и имеет самоограничение по толщине — не более 100 нм. Это происходит потому, что используется диффузионный способ доставки углерода к месту реакции через уже сформированный слой 3C-SiC и поднимать температуру свыше 1400 °С для интенсификации процесса диффузии невозможно — кремний просто расплавится ($T_{\text{пл}} = 1414,85$ °С).

В настоящей работе мы предлагаем методы формирования кубического карбида кремния (3C-SiC) на кремнии (Si) в низкотемпературной плазме высокочастотного, высокочастотного индуктивного и сверхвысокочастотного разрядов. Все исследования проводили на макетных установках, схемы которых представлены на рис. 1—4.

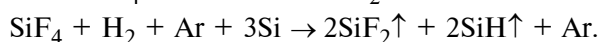
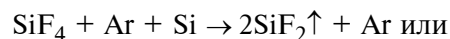
Все наши технологические процессы были многостадийными и их проводили в плазме при низких давлениях. В качестве реагентов использовали SiF₄, CF₄, CH₄, H₂, Ar. Из них образовывали следующие технологические смеси: SiF₄ + CF₄ + Ar; SiF₄ + CH₄ + Ar.

Рассмотрим более детально каждую стадию.

I стадия — промывка технологической смесью



II стадия — очистка и травление поверхности



Аргон — легкоионизируемая газовая добавка, поэтому требуется меньше энергии для обеспечения высокой степени ионизации газовой смеси, да

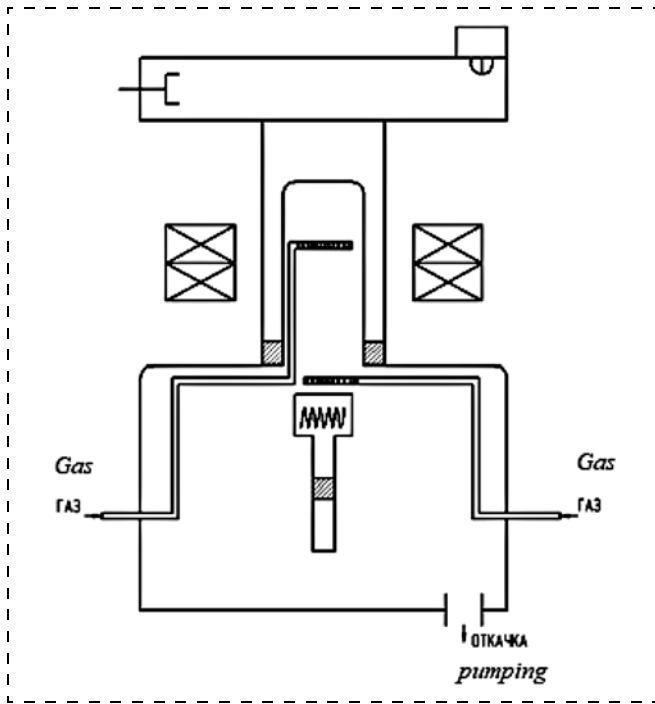
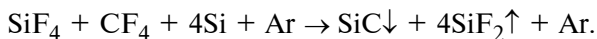


Рис. 3. Схема СВЧ макетной установки
Fig. 3. Circuit of the microwave model installation

и обработка поверхности Si ионами Ar^+ полезна при очистке поверхности.

III стадия — имплантация — карбонизация.

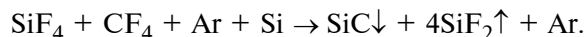
Подаем смещение "-" на пластину Si и проводим процесс в газовой смеси



Аргон выполняет ту же функцию, что и в стадии II.

IV стадия — формирование пленки SiC

Эта стадия является продолжением стадии III только без смещения, т. е.



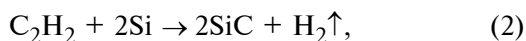
Все стадии и результаты после их проведения можно изобразить графически (рис. 5).

Хорошо "работает" и смесь $SiF_4 + CH_4 + Ar$:



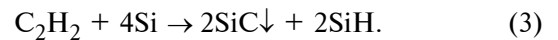
Можно расписать и так, что часть CH_4 с помощью Ar в плазме преобразуется в ацетилен C_2H_2 , т. е. $8CH_4 \rightarrow 4C_2H_2 + 12H_2$.

На начальном этапе (III стадия) может протекать процесс с использованием в качестве источника Si самой пластины. В литературе есть сообщение [8] о таком процессе:

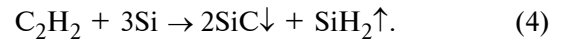


т. е. идет эпитаксиальный рост 3C-SiC при температурах 800...1100 °C при давлении $1 \cdot 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ Торр.

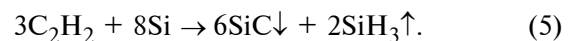
В наших (плазменных) условиях вероятнее всего процесс идет с образованием не H_2 , а SiH_x , т. е. если образуется SiH, то процесс можно записать



Если образуется SiH_2 , то можно записать



Если образуется SiH_3 , то будем иметь следующий механизм:



И наконец, если конечным продуктом будет SiH_4 , то можно записать

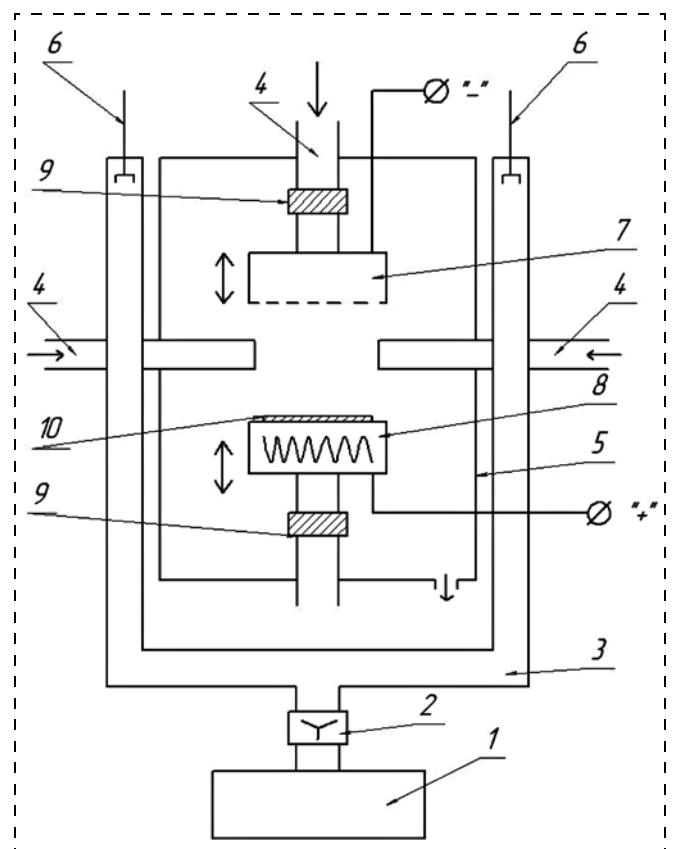
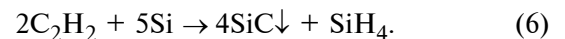


Рис. 4. Схема макета СВЧ установки: 1 — СВЧ-генератор; 2 — циркулятор; 3 — волноводный тракт; 4 — газоввод; 5 — реакционная камера; 6 — КЗ-поршень; 7 — электрод-газораспределитель; 8 — подогреваемый столик для образцов; 9 — изолятор; 10 — обрабатываемая пластина

Fig. 4. Circuit of the model microwave installation: 1 — microwave generator; 2 — circulator; 3 — waveguide path; 4 — gas-input; 5 — reactionary camera; 6 — piston; 7 — electrode-gas-distributor; 8 — heated table for samples; 9 — insulator; 10 — the processed plate

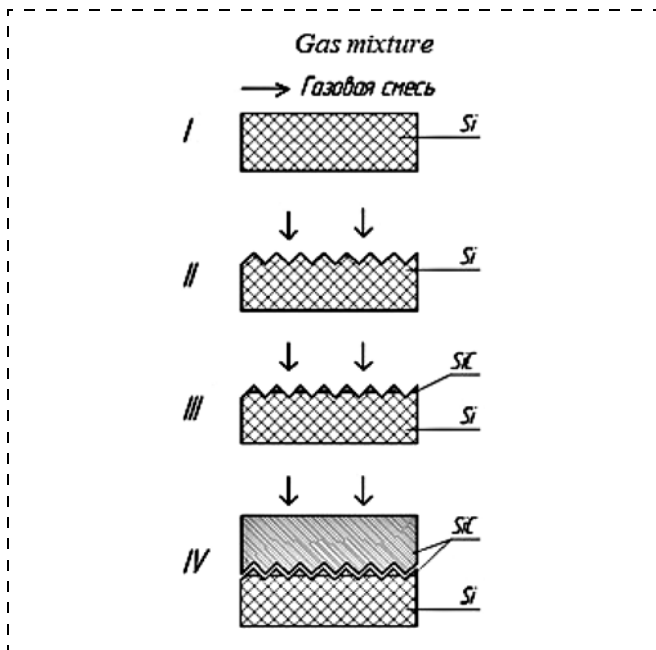


Рис. 5. Графическое изображение стадий процесса
Fig. 5. Graphic image of the process stages

Как видно из реакций (3)—(6), наряду с образованием SiC (3C-SiC) всегда один или два атома кремния переводятся в летучее состояние и удаляются из решетки Si исходной пластины. Таким образом, устраняется напряженное состояние между решетками Si и SiC, вызванное отличием их параметров.

В нашем случае есть и эпитаксиальный рост 3C-SiC по уравнению (1) и все промежуточные реакции по превращению CH_4 в C_2H_2 и его реакции с подложкой по (2)—(6), которые не очень длительны. Следует считать, что реакции (2)—(6) протекают по диффузионному механизму, а (1) — это PECVD-процесс, который быстро блокирует протекание реакций (2)—(6), что нам и требуется, т. е. переходной слой очень тонкий и не образуется макропор, как при использовании в качестве источника углерода CO [6, 7]. В работах [6] и [7] рассмотрен чисто термический диффузионный процесс и предложенный механизм образования пор при формировании 3C-SiC на Si хорошо описывает протекающий процесс.

В нашем случае тонкий переходной слой вместе с 3C-SiC на вершинах пирамид (за счет имплантации C^+) обеспечивают хорошее согласование решеток Si и 3C-SiC и дальнейший плазмохимический эпитаксиальный рост слоев требуемой толщины 3C-SiC.

Следует сразу отметить, что в экспериментах мы всегда наблюдаем утонение исходных пластин Si в процессе формирования слоев 3C-SiC.

Уменьшение толщины пластины Si лежит в диапазоне 70...120 мкм, что говорит о том, что Si все-таки удаляется и, вероятнее всего, протекают оба процесса — и эпитаксиальный рост (превалирует), и диффузия атомов Si (в соединениях SiH_x) через 3C-SiC, только так можно объяснить экспериментальный факт утонения пластин.

Следует обратить внимание и на следующую особенность: мы проводим процессы в плазме, а это значит, что поверхность пластины Si и образующегося слоя 3C-SiC подвержены бомбардировке заряженными частицами. При этом должны и образуются дефекты структуры — вакансии, которые диффундируют внутрь кристалла, а это эквивалентно тому, что атомы Si движутся к поверхности, где "связываются" с компонентами наших газовых сред и образуют 3C-SiC и SiH_x , т. е. мы из структуры монокристалла Si переводим в летучее состояние отдельные атомы Si и тем самым сопрягаем решетки 3C-SiC и пластины Si. Это еще одно объяснение утонения пластины и надежности сопряжения материалов с отличающимися параметрами решетки.

Конечно, необходимо дополнительно разбираться с механизмами протекающих процессов и ставить специальные физические эксперименты, пока это только предположение о механизме экспериментального факта — утонения.

Экспериментальная часть

Как указывалось выше, все эксперименты проводили на макетных установках (см. рис. 1—4).

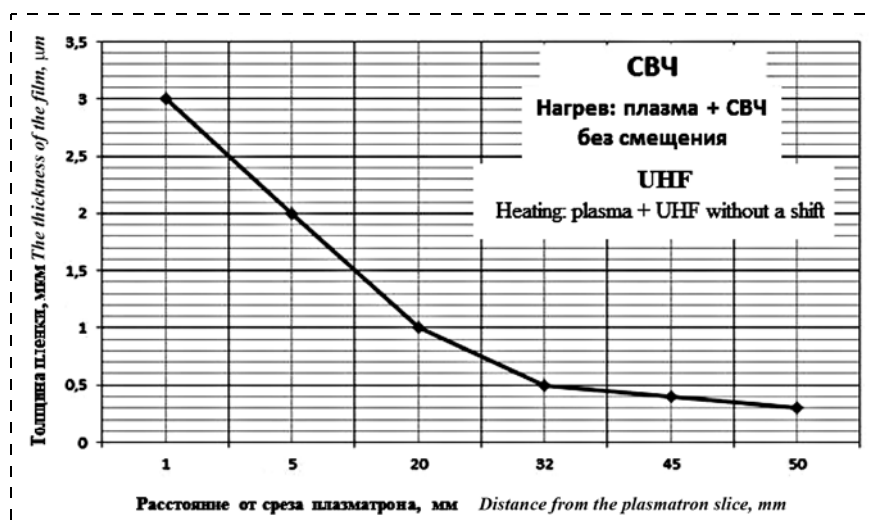


Рис. 6. Зависимость толщины пленки от расстояния до среза плазматрона
Fig. 6. Dependence of a film's thickness on the distance from the plasmatron slice

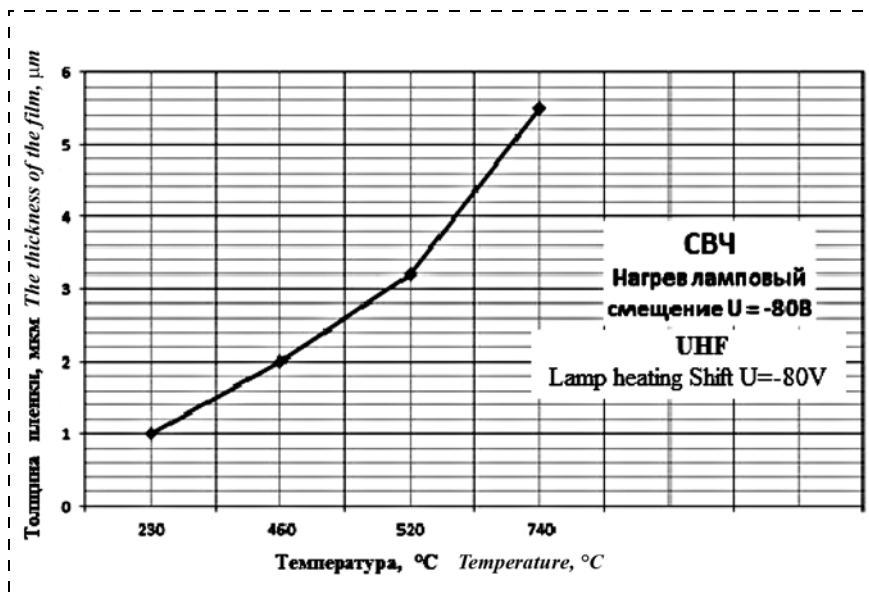


Рис. 7. Зависимость толщины пленки от температуры
 Fig. 7. Dependence of a film's thickness on temperature

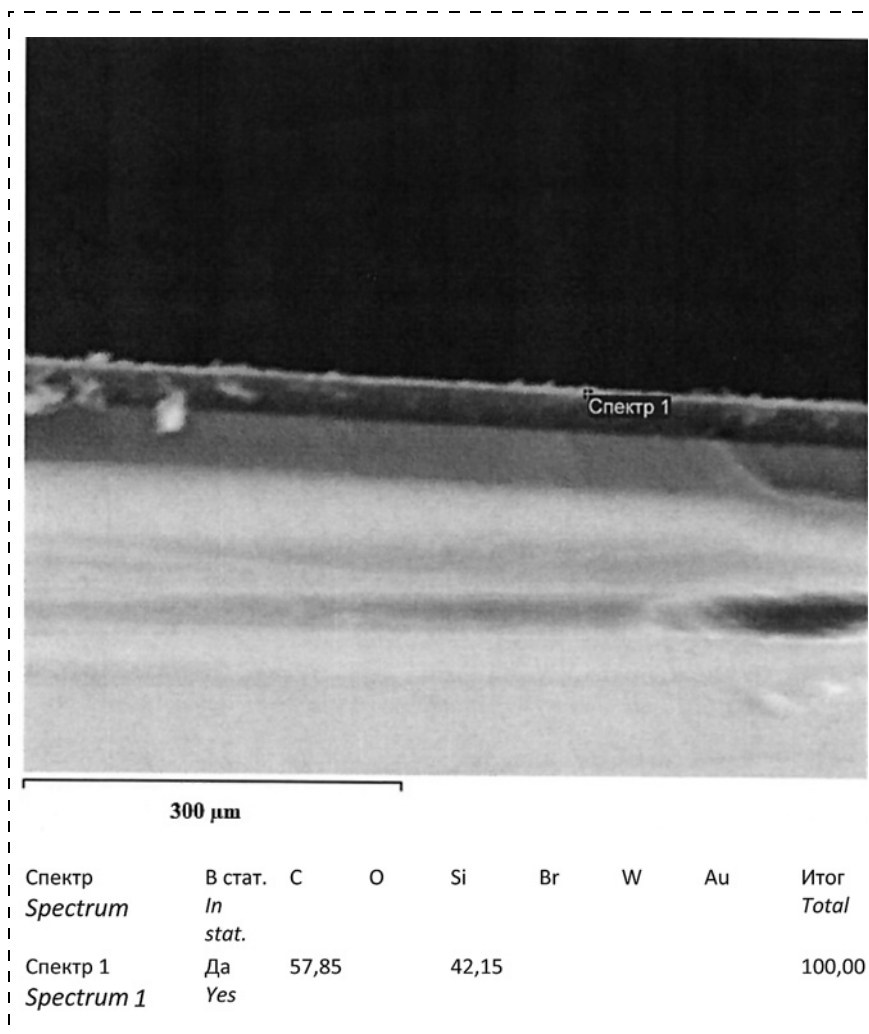


Рис. 8. Кубический карбид кремния на кремнии (3C-SiC на Si)
 Fig. 8. Cubic silicon carbide on silicon (3C-SiC on Si)

Эксперименты на СВЧ установках (см. рис. 3 и 4) проводили как с нагревом от плазмы и СВЧ поля, так и подогревом предметного столика с помощью ламп с электрическим смещением столика с пластиной и без него. Пластины помещали на различных расстояниях от места генерации плазмы (среза кварцевой стенки реактора). Основные результаты представлены на рис. 6 и 7.

Проводили эксперименты и по двухсторонней обработке, при этом пластину располагали вертикально в области катушек (см. рис. 3) без внешнего нагрева. Рост 3C-SiC наблюдали на обеих сторонах пластины.

Как правило, время наращивания составляло 1 ч, время продувки (промывки) камеры рабочей смесью — 5...10 мин, время травления — 15...30 мин, время карбидизации — 30...40 мин. Толщины сформированных пленок составляли 3...7 мкм. Проводили эксперименты и по горизонтальному расположению пластин в той же области (середина катушек), для этого использовали специальную кварцевую подставку, изготовленную из тонкого (диаметром 3 мм) штабика.

Результаты были аналогичны вертикальному расположению пластины. В экспериментах использовали кремниевые пластины КДБ12 с ориентацией (100) и (111), диаметром 76 мм, рабочее давление $P = 1,1 \cdot 10^0 \dots 1,1 \cdot 10^{-2}$ Торр.

Предварительную безмасляную откачку осуществляли в течение 30...60 мин при давлении $1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ Торр.

Эксперименты с ВЧ разрядами (см. рис. 1 и 2) проводили с теми же пластинами КДБ12 и ориентациями (100), (111). Все технологические стадии проходили при тех же параметрах что и в СВЧ разряде. Результаты значительно отличались. Например, пластины Si (100), помещенные на графитовый пьедестал на расстоянии

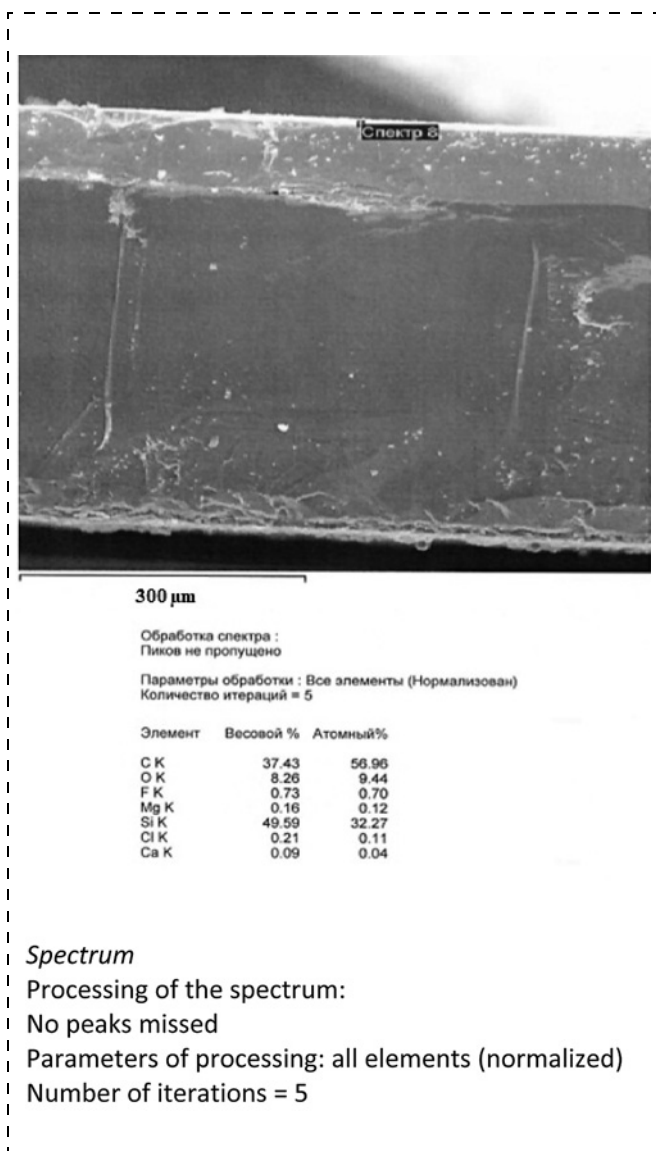


Рис. 9. Кубический карбид кремния на кремнии (3C-SiC на Si)
Fig. 9. Cubic silicon carbide on silicon (3C-SiC on Si)

20...30 мм от индуктора, за 4 ч модифицировались на всю толщину и утонялись на максимальную толщину 120 мкм (исходная толщина 375 мкм).

За 1 ч обработки толщины слоев достигали 30...60 мкм. Когда к ВЧИ разряду подключалась и диодная система (с частотой 13,56 МГц), смещение доходило до -860 В, за 1 ч обработки образовывалась мембрана 3C-SiC настолько тонкая, что рассыпалась при попытке ее извлечения. Это говорит о том, что наряду с процессами образования 3C-SiC протекали (и они превалировали) процессы травления. Эксперименты с ВЧ системами показали, что смещение не должно превышать -50 В. В этом случае формируются качественные слои толщиной 30...40 мкм. Соотношение Si/C близко к стехиометрическому. Результаты представлены на рис. 8, 9.

Заключение

На макетных образцах ВЧ, ВЧИ, ВЧИ + ВЧ, СВЧ плазменных технологических установок были сформированы слои 3C-SiC на Si. Для того чтобы слои не отслаивались от Si (ввиду разницы параметров решетки) процесс должен быть многостадийным и операция травления обязательна и должна предшествовать имплантации и дальнейшему эпитаксиальному росту. Сформированные таким образом слои 3C-SiC на Si можно использовать для создания силовых приборов, датчиков, как подслои для нитридных приборов и т. п. и заменить дорогие SiC подложки Cree (США).

На способ СВЧ плазменного формирования пленок кубического карбида кремния на кремнии получен патент РФ [9].

Список литературы

1. Лучинин В. В., Мальцев П. П., Поляков Е. П. Широкозонные материалы — основа экстремальной электроники будущего // Микроэлектроника. 1999. Т. 28, № 1. С. 21—29.
2. Способ эпитаксиального выращивания монокристаллических слоев кубического SiC: А. с. 1710604 А1 SU: МПК С30 В 25/02, 29/36 / Баранов И. М., Белов Н. А., Дмитриев В. А., Кондратьев Т. С., Челноков В. Е., Шаталов В. Ф., Эрмих Р. Н. 07.02.1992. Бюл. № 5.
3. Способ самоорганизующейся эндотаксии моно 3C-SiC на Si подложке. Патент 2370851 С2 РФ: МПК H01L 21/205 / Чепурнов В. И. 20.10.2009. Бюл. № 17.
4. Матузов А. В. Технология структур карбид кремния — кремний для приборов микроэлектроники и микросистемной техники. Автореферат дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Санкт-Петербург, 2008.
5. Полупроводниковая сэндвич-структура 3C-SiC на Si, способ ее получения и чувствительный элемент мембранного типа с ее использованием: Патент РФ № 2395867, H01L 21/205, B82В 1/00, B82В3/22 / Матузов А. В., Афанасьев А. В., Ильин В. А., Кривошеева А. Н., Логинов Б. Б., Лучинин В. В., Петров А. С. от 20.04.2010. Бюл. № 11.
6. Кукушкин С. А., Осипов А. В. Новый метод твердофазной эпитаксии карбида кремния на кремнии: модель и эксперимент // Физика твердого тела. 2008. Т. 50, вып. 7. С. 1188—1195.
7. Способ получения изделия, содержащего кремниевую подложку с пленкой из карбида кремния на ее поверхности: Патент РФ № 2363067 / Кукушкин С. А., Осипов А. В., Феоктистов Н. А. от 27.07.2009. Бюл. № 21.
8. Mogab C. J., Leamy H. J. Conversion of epitaxial SiC by reaction with C₂H₂ // Journal of Applied Physics. 1974. Vol. 45, N. 3. P. 1075—1084.
9. Способ СВЧ плазменного формирования пленок кубического карбида кремния на кремнии: Патент 2538358 С1 РФ: МПК H01L 21/205, B82В 3/00 / Аристов В. В., Мальцев П. П., Редькин С. В., Федоров Ю. В. от 10.01.2015. Бюл. № 1.

S. V. Red'kin, Ph. D., Leading Researcher, e-mail: sergeiredckin@yandex.ru,
V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow

Corresponding author:

Red'kin Sergey V., Ph. D., Leading Researcher, V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow, sergeiredckin@yandex.ru

Cubic Silicon Carbide on Silicon for the Microwave, Power and Optoelectronics

Received on September 19, 2019

Accepted on October 07, 2019

Research has been conducted for development of the basic technology for formation of the cubic silicon carbide (3C-SiC) on silicon (Si) plates in plasma of high-frequency (HF and HFI) and superhigh-frequency (microwave) discharges at a low pressure. It was established that the process of formation of 3C-SiC layers on Si should be a multistage one, but integrated, i.e. one stage should follow another one without devacuuming of the working camera, only the modes, the gas environments and the electric displacement supply, could be changed. The following technological mixes were proposed: $\text{SiF}_4 + \text{CF}_4 + \text{Ar}$; $\text{SiF}_4 + \text{CH}_4 + \text{Ar}$. It was established that a four-hour processing in HFI discharge allows us to modify a silicon (Si) plate with thickness of 375 μm into the silicon carbide (3C-SiC) through all its thickness. It should be noted that at the same time, the plate was thinned to the maximal thickness of just 120 μm . In the proposed plasma methods for formation of 3C-SiC into Si the temperatures did not exceed 800 °C. 3C-SiC layers can be used for creation of powerful nitride devices in the microwave range, power instruments and other electronic products.

Keywords: cubic silicon carbide, silicon, PECVD process, carbidization, etching, cleaning, layer, plate

For citation:

Red'kin S. V. Cubic Silicon Carbide on Silicon for the Microwave, Power and Optoelectronics, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 12, pp. 709–720.

DOI: 10.17587/nmst.21.709-720

Introduction

Now, among the topical questions of a broad use of the wide-band semiconductors in industry is one of the silicon carbide, but the hexagonal polytypes (4H and 6H) applied today are expensive. Therefore, the growth of a cubic polytype of 3C-SiC on silicon considerably reduces the cost of such plates — 3C-SiC on Si, besides it is more technological — it does not require a change of the existing routes in the devices' production, it is only necessary to add one more operation at the beginning of a route — grows of a 3C-SiC layer of the required thickness, in order to get at the output qualitatively new products: heat- and radiation resistant devices. The given work presents an attempt of development of an essentially new plasma technology for formation of 3C-SiC layers on Si, different from the thermal methods. We managed to form 3C-SiC layers at temperatures not exceeding 800 °C and below — the heating was carried out by the plasma itself and partly by the microwave field. We considered plasmas of three discharges — a traditional high-frequency (HF), a discharge in a diode system (13.56 MHz) of high-frequency induction (HFI), and a combination of HF diode and HF induction, and also a superhigh-frequency (microwave) discharge (2.45 GHz) with a magnetic field (ECR — electron cyclotron resonance). Below we will

consider certain features of the plasma of the above discharges and the received experimental results.

Development of the wide-band materials, first of all, silicon carbide (further — SiC) and nitrides of the third group, becomes one of the main directions in development of modern semiconductor electronics.

On the basis of the analysis of the forecasts of the leading experts in the area of the semiconductor electronics, presentations of the leading companies at conferences and analysis of the journal articles, a universally recognized conclusion was drawn that the potential opportunities of the semiconductor materials — silicon and arsenide of gallium were almost completely exhausted. The progress in the field of development of devices of a new generation is connected with improvement of the technology of the devices on the wide-band semiconductors (SiC, GaN, diamond, etc.). Expectations concerning development of a new generation of devices for the high-temperature power and high-frequency electronics, advance of the semiconductor optoelectronics into the short-wave part of the visible and near ranges of the ultra-violet range are connected with the technological mastering of this class of materials.

Unique properties of SiC:

- Big width of the forbidden zone (2.3...3.3 eV for various polytypic forms);
- Extremely high critical field of the avalanche breakdown (2...5 mV/cm);

— Heat conductivity ($\lambda_{\text{SiC}} = 3...5 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$) surpassing the heat conductivity of copper at the room temperature.

All this makes SiC one of the most promising materials for the high-temperature, radiation-resistant and power electronics [1].

In world practice SiC substrates are mainly used for development of certain military and special-purpose devices known for their especially strict requirements in combination with a high speed. Mass application of the silicon carbide products in the electronic component base (further — ECB) is restrained by high costs of the SiC substrates. Therefore, development of methods aimed to reduce the costs of ECB on the basis of SiC is an urgent problem. In Russia this problem is particularly acute due to the necessity of import substitution of the expensive substrates from CREE Company (USA), on the delivery of which to the Russian Federation an embargo was imposed. Therefore, development of an economically efficient technology for formation of "silicon carbide on silicon" structures is a promising solution to the above problem, because it will create technical and economic conditions for carrying out of large-scale R & D of the radiation-resistant microwave ECB products and their introduction in the perspective samples of products for different purposes.

There are many various ways for formation of SiC on Si, mainly, it is a 3C-SiC polytype both on sublayers, and without sublayers, with the use of various gas systems as sources of Si and C, with the use of the substrate itself as the source of Si. For example, Physics and Technology Institute named after A. F. Ioffe developed an unbuffered method for growing of a single-crystal cubic SiC on Si substrates from monosilane and trichlorethylene at $\text{Si}/\text{C} = 1$ on the standard quartz equipment for receiving of the epitaxial layers of silicon [2], i.e. in the $\text{SiH}_4 + \text{C}_2\text{HCl}_3 + \text{H}_2$ environment at the temperature of 1050...1250 °C. It was a multistage process envisaging warming up of a Si substrate in the atmosphere of hydrogen at the atmospheric pressure during 10 min. It was also preceded by a peroxide-ammoniac washing and a hydrogen purging during 1 h with consumption of 76 l/min of the latter. After 10 min in a flow of hydrogen an operation of etching was performed in hydrogen chloride at the temperature of 1000 °C. Then the supply of HCl was stopped, the temperature was increased up to 1050 °C and only after that the monosilane (0.03 l/min) and a flow of trichlorethylene were introduced (the speed of the hydrogen flow via the bubbler with trichlorethylene was 0.3 l/min). As the gas carrier of the reagents hydrogen was used (the speed of the flow was 87 l/min). As we see, everything was quite complicated. Growing of 3C-SiC on Si was carried out on KDB-10 plates with orientation of (100) and (111).

We described this process in detail only because in this work we proposed (most likely, for the first time, the author has no earlier information) an integrated method for growing of 3C-SiC layers on Si consisting of several stages. It coincided with the results of our experiments described below.

We should mention an interesting way of a self-organized endotaction of mono 3C-SiC on a Si substrate [3]. The process takes place in HF field in the range of temperatures of 1360...1380 °C in a flow of hydrogen (H_2) of 0.3...0.5 l/min with a zone from graphite, where CH_x volatile compounds are formed, which are transferred to a Si substrate. The source of Si is the substrate itself. All these are unbuffered methods. It is also necessary to consider the methods with formation of an intermediate porous layer for minimization of the mechanical tensions between the 3C-SiC layer and Si, arising due to a mismatch of the periods of the lattices (~20 %) and differences in temperature coefficients of linear expansion (~8 %) [4]. In this work three types of buffer layers were considered:

- Carbonization of the silicon surface in the carbon-bearing plasma at temperatures of about 1300 °C;
- Nanoporous silicon;
- Carbonized nanoporous silicon.

The author of the work believes that the minimal level of the mechanical tensions in 3C-SiC/Si structures can be reached due to the use of the substrates with a buffer layer from a nanoporous silicon during the process in the range of temperatures of 1350...1370 °C.

For creation of *n*-3C-SiC/*p*-Si heterostructures with improved electrophysical characteristics it is necessary to use carbonized nanoporous silicon [4] as the buffer layer.

Epitaxial 3C-SiC layers were formed from the reactionary gases (5 % solution of C_3H_8 (propane) in H_2) and (5 % solution of SiH_4 (monosilane) in Ar), as the transport gas the hydrogen (H_2) was used, which underwent finishing cleaning. Separate supply of the monosilane and propane allowed us to vary Si/C ratio in the gas phase.

We should emphasize that the growth of 3C-SiC was carried out at the atmospheric pressure, within the range of temperatures of 1100...1390 °C, the obtained 3C-SiC on Si layers were 0.5...3.0 μm -thick and without inclusions of other polytypes [4].

Similar gas mixes for growth of 3C-SiC were used in the work [5].

The works [6] and [7] describe the method for formation of an intermediate porous layer in the course of growth of 3C-SiC on Si. The process of the epitaxial growth was carried out between Si of the plate and the gas phase (CO) at heating up to 1100...1400 °C and

pressure of $P = 10 \dots 300$ Pa. The process goes according to the following reaction:



In this reaction one molecule of SiC is formed instead of two Si atoms, because one Si atom is removed from system together with SiO gas, and thus the pores in the Si plate are formed. The method is good in all respects, only it proceeds at rather high temperatures and has a self-restriction by thickness — not more than 100 nm. This is explained by the fact that the diffusion method is used for delivery of carbon to the place of reaction through the already formed layer of 3C-SiC and it is not possible to raise the temperature over 1400 °C for intensification of the diffusion process — the silicon will just melt ($T_{\text{пл}} = 1414.85$ °C).

In the given work we propose the methods for formation of cubic silicon carbide (3C-SiC) on silicon (Si) in a low-temperature plasma of high-frequency, high-frequency inductive and superhigh-frequency (micro-wave) discharges. All the research works were conducted on model installations, the designs of which are presented in fig. 1–4.

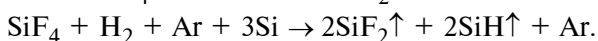
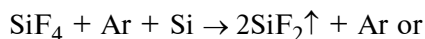
All our technological processes were multistage ones and were carried out in plasma at low pressures. SiF₄, CF₄, CH₄, H₂, Ar were used as reagents and the technological mixes of SiF₄ + CF₄ + Ar; SiF₄ + CH₄ + Ar were formed from them.

Let us consider each stage in detail.

I stage — washing with the technological mix of



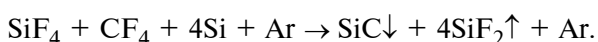
II stage — cleaning and etching of the surface of



Argon is an easily ionized gas additive, therefore, less energy is required in order to ensure a high degree of ionization of the gas mix, and the processing of the surface of Si by Ar⁺ ions is useful for cleaning of the surface.

III stage — implantation — carbonization.

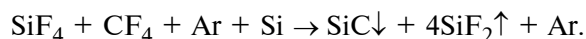
We shift "—" to the Si plate and carry out the following process in the gas mix:



Argon performs the same function, as in the second stage.

IV stage — formation of a SiC film.

This stage is a continuation of the third stage, only without a shift, i.e.



All the stages and the results after their carrying out can be presented graphically (fig. 5).

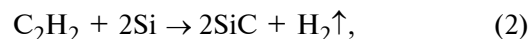
SiF₄ + CH₄ + Ar mix also "works" well:



It is also possible to present this so that by means of Ar in plasma a part of CH₄ is transformed into acetylene, C₂H₂, i.e. $8\text{CH}_4 \rightarrow 4\text{C}_2\text{H}_2 + 12\text{H}_2$.

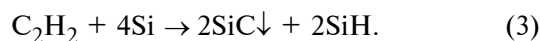
At the initial stage (the III stage) the process can proceed with the use of Si of the plate itself as the source.

In literature there is such a message [8]

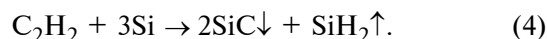


i.e. the epitaxial growth of 3C-SiC proceeds at temperatures of 800...1100 °C under pressure of $1 \cdot 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ Torr.

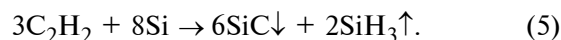
In our (plasma) conditions, most likely, the process goes with formation of not H₂, but SiH_x i.e. if SiH is formed, then the process can be presented in the following way:



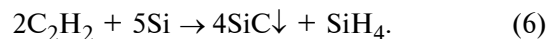
If SiH₂ is formed, it is possible to put it down in the following way:



If SiH₃ is formed, then we will have the following mechanism:



And, at last, if the final product is SiH₄, then it is possible to write down the following:



As it is visible from reactions (3)–(6), alongside with formation of SiC (3C-SiC) we always transfer one or two atoms of silicon into a volatile state and we remove it from the Si lattice of the initial plate. Thus, we eliminate the tension between the lattices of Si and SiC caused by the difference in their parameters.

In our case there is also an epitaxial growth of 3C-SiC according to the equation (1) and all the intermediate reactions for transformation of CH₄ into C₂H₂ and its reaction with the substrate according to (2)–(6), which are not very long. It is necessary to consider that reactions (2)–(6) proceed according to the diffusive mechanism, while (1) is a PECVD process which quickly blocks the course of the reactions (2)–(6), which is exactly what we need, i.e. the transitional layer is very thin and it does not form macropores, like during the use of carbon CO [6, 7] as a source. In the works [6] and [7] a purely thermal diffusive process goes on and the proposed mechanism for formation of the pores during formation of 3C-SiC on Si describes well the proceeding process.

In our case a thin transitional layer together with 3C-SiC at the tops of the pyramids (due to implantation of C^+) ensures good coordination of the lattices of Si and 3C-SiC and the further plasmochemical epitaxial growth of the 3C-SiC layers of the required thickness.

We should underline at once that in the experiments we always observe thinning of the initial plates of Si in the course of formation of 3C-SiC layers.

Reduction of the thickness of the Si plate was within the range of 70...120 μm , which means that Si was in the process of being removed and, most likely, both processes proceeded — the epitaxial growth (which prevailed) and also the diffusion of Si atoms (in the SiH_x compounds) through 3C-SiC, and this was the only way it was possible to explain the experimental fact of thinning of the plates.

It is necessary also to pay attention to the following feature: we carry out the processes in plasma, and that means that the surface of the Si plate and of the emerging 3C-SiC layer are subjected to bombing by the charged particles. At that, the defects of the structure — vacancies are formed, which diffuse inside the crystal, and this is equivalent to movement of the Si atoms to the surface where they bound with the components of our gas environments and form 3C-SiC and SiH_x , i.e. we transfer separate Si atoms from the structure of the Si monocrystal into a volatile state and by that we interface the lattices of 3C-SiC and Si plate. It is one more explanation of thinning of the plate and reliability of the interface of the materials with different lattice parameters.

Of course, it is necessary to study additionally the mechanisms of the proceeding processes and to undertake special physical experiments, and, so far, it is only an assumption concerning the mechanism of the experimental fact — thinning.

Experimental part

As it was stated above, all the experiments were conducted on model installations (see fig. 1—4).

The experiments on the microwave installations (see fig. 3 and 4) were carried out either with heating from plasma and the microwave field, or with heating of the subject table by means of lamps with an electric shift of the table, with a plate or without it. The plate was placed at various distances from the source of generation of plasma (a slice of the quartz wall of the reactor). The main results are presented in fig. 6 and 7.

There were also experiments with a bilateral processing, at that, a plate was put vertically in the field of coils (see fig. 3) without an external heating. Growth of 3C-SiC was observed on both sides of the plate.

As a rule, the time of growth was 1 h, the time of a purge (washing) of the camera with the working mix —

5...10 min, the time of etching — 15...30 min, the carbidization time was 30...40 min. The thicknesses of the created films were 3...7 μm . Experiments were also conducted with a horizontal arrangement of the plates in the same area (middle of the coils), and for this purpose a special quartz support was used made from a thin (3 mm diameter) spline.

The results were similar to the ones of the vertical arrangement of the plate. The silicon plates used in the experiments were KDB12 with orientation (100) and (111), the diameter of 76 mm, and the working pressure of $P = 1.1 \cdot 10^0 \dots 1.1 \cdot 10^{-2}$ Torr.

A preliminary oil-free pumping was carried out within 30...60 min at the pressure of $1 \cdot 10^{-4} \dots 1.1 \cdot 10^{-5}$ Torr.

The experiments with HF discharges (see fig. 1 and 2) were carried out with the same plates of KDB12 and (100), (111) orientations. All the technological stages were conducted at the same parameters as in case with the microwave discharge. The results differed considerably. For example, the plates of Si (100) placed on a graphite pedestal at distances of 20...30 mm from the inductor in 4 h were modified in all their thicknesses and were thinned by the maximal thickness of 120 μm (the initial thickness was 375 μm).

In 1 h of processing the thicknesses of the layers reached 30...60 μm . When a diode system (with frequency of 13.56 MHz) was also connected to HFI discharge, the shift reached 860 V, and in 1 hour of processing such a thin membrane of 3C-SiC was formed that it went to pieces at an attempt of its extraction. That means that alongside with the processes of formation of 3C-SiC there were also the processes of etching (and they prevailed). The experiments with HF systems demonstrated that a shift must not exceed -50 V. In this case the qualitative layers with 30.40 μm thickness were formed. The Si/C ratio was close to the stoichiometric one. The results are presented in fig. 8 and 9.

Conclusion

3C-SiC layers on Si were formed on the model samples of HF, HFI, HFI + HF and microwave plasma technological installations. In order to prevent the layers' exfoliation from Si (because of the difference in the lattice parameters) the process had to be a multistage one and the operation of etching was obligatory and had to precede to the implantation and the further epitaxial growth. Thus obtained layers of 3C-SiC on Si can be used for development of the power devices, sensors, sublayers for the nitride devices, etc. and they can be a substitute for expensive SiC substrates from CREE (USA).

The method of the microwave plasma formation of films of the cubic carbide of silicon on silicon is protected by a patent of the Russian Federation [9].

References

1. **Luchinin V. V., Maltsev P. P., Polyakov E. P.** Wide-band-gap materials — the basics of the high power electronics of the future. *Microelectronics*, 1999, vol. 28, no. 1, pp. 21–29 (in Russian).
2. **The method** of epitaxial growth of single-crystal layers of cubic SiC: Certificate 1710604 A1 SU: IPC C30 B 25/02, 29/36 // Baranov I. M., Belov N. A., Dmitriev V. A., Kondratiev T. S., Chelnokov V. E., Shatalov V. F., Ermikh R. N. 02/07/1992. No. 5 (in Russian).
3. **Method** of self-organizing endotaxy of mono 3C-SiC on a Si substrate": Patent 2370851 C2 of the Russian Federation: IPC H01L 21/205 / Chepurinov V. I. 10/20/2009. Bull. Number 17 (in Russian).
4. **Matuzov A. V.** The technology of "Silicon Carbide on a Silicon" for microelectronics devices and microsystem technology. Abstract dis. for PhD degree. St. Petersburg State Electro-technical University, St. Petersburg 2008 (in Russian).
5. **3C-SiC on Si semiconductor-based** sandwich structure, a method for its preparation and a membrane-type sensitive element: RF Patent No. 2395867, H01L 21/205, B82B 1/00, B82B3/22 / Matuzov A. V., Afanasyev A. V., Ilyin V. A., Krivosheeva A. N., Loginov B. B., Luchinin V. V., Petrov A. S. from 04/20/2010. Bull. No. 11 (in Russian).
6. **Kukushkin S. A., Osipov A.** A new method of solid-phase epitaxy of silicon carbide on silicon: model and experiment, *Solid State Physics*. 2008, Volume 50, Is. 7, pp. 1188–1195 (in Russian).
7. **A method** for producing a device containing a silicon substrate with a silicon carbide film on its surface." RF patent № 2363067 / Kukushkin S. A., Osipov A. V., Feoktistov N. A. from 07/27/2009. Bull. No. 21 (in Russian).
8. **Mogab C. J., Leamy H. J.** Conversion of epitaxial SiC by reaction with C_2H_2 // *Journal of Applied Physics*. 1974, Vol. 45, No. 3. pp. 1075–1084.
9. **Method** for microwave plasma formation of cubic silicon carbide films on silicon: Patent 2538358 C1 of the Russian Federation: IPC H01L 21/205, B82B 3/00 / Aristov V. V., Maltsev P. P., Redkin S. V., Fedorov Yu. V., dated 10.01.2015. Bull. No. 1 (in Russian).

УДК 620.3

DOI: 10.17587/nmst.21.720-726

С. В. Булярский, д-р физ.-мат. наук., проф., гл. науч. сотр., bulyar2954.mail.ru,
Д. А. Коива, мл. науч. сотр., **Е. А. Першина**, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.,
Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ОКСИДА ТИТАНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Поступила в редакцию 08.10.2019

Представлена разрабатываемая технология получения тонких пленок диоксида титана методом магнетронного распыления мишени титана в атмосфере аргона и кислорода. Вакуумный отжиг пленок после напыления позволил получить крупноблочные монокристаллические пленки диоксида титана в фазе анатаза. Монокристалличность пленок подтверждается исследованием просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, комбинационного рассеяния света и люминесценции.

Ключевые слова: диоксид титана, анатаз, просвечивающая электронная микроскопия, комбинационное рассеяние света, люминесценция, вакансия кислорода

Введение

Диоксид титана (TiO_2) является технологически важным полупроводниковым соединением, поскольку обладает рядом следующих уникальных свойств: широкой запрещенной зоной [1]; высоким показателем преломления [2, 3]; большой диэлектрической проницаемостью [4, 5]. В связи с этим с практической точки зрения важны его оптические и фотохимические свойства [6, 7]. Кроме того, обладая полупроводниковыми свойствами, оксид титана может быть использован в качестве датчика контроля воздушно-топливной смеси в автомобильных двигателях [8, 9]. Высокая диэлектрическая проницаемость расширяет возможности применения TiO_2 в электронике, например, в качестве конденсатора и запоминающего устройства. Диоксид титана имеет широкую область гомоген-

ности, поэтому важную роль играют дефекты, связанные с вакансией кислорода. Одним из таких дефектов является рекомбинационный центр Ti^{+3} — вакансия кислорода [10], который играет важную роль в фотокатализе.

Важным направлением является отработка технологии получения тонких наноразмерных пленок диоксида титана нанометровой толщины и исследование методов модификации свойств данных пленок. Цель настоящей работы — получение кристаллических пленок диоксида титана в модификации анатаза и исследование их свойств.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Пленки диоксида титана получали посредством магнетронного распыления титановой мишени в атмосфере аргона и кислорода на термически

оксидированные пластины монокристаллического кремния *n*-типа ($\rho_n = 0,001...0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) толщиной 460 мкм. Толщина оксида — 1,7 мкм. Вся серия подложек на этапе подготовки подвергалась гидромеханической очистке от загрязнений на установке DNS Screen.

Для осаждения тонких пленок использовали высокочастотное магнетронное распыление, благодаря чему удалось получить пленки заданного состава, в том числе стехиометрического. Расстояние между мишенью и подложкой для всех экспериментов было зафиксировано на уровне 45 мм. Напыление тонкой пленки TiO_2 осуществлялось из мишени металлического титана чистотой 99,97 % в смеси аргона с кислородом в определенной пропорции. Непосредственно перед напылением пленок на подложку мишень предварительно распыляли на специальную заслонку, чтобы удалить с нее слой оксида, образовавшийся во время предыдущих процессов.

Остаточное давление в вакуумной камере составляло $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Рабочее давление фиксировалось на уровне $2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. при распылении в среде аргон/кислород. Подача рабочих газов в камеру осуществлялась с помощью двух автоматических регуляторов расхода газа с точностью задания и точностью поддержания газовой смеси $\pm 0,8 \%$, что позволяло задавать концентрацию газов в рабочей газовой смеси аргон-кислород с точностью $\pm 1,6 \%$. Отношение Ar/O_2 составляло 20:5. Процесс проходил при мощности магнетрона 200 Вт.

Толщину формируемых тонкопленочных структур можно регулировать либо заданием значения скорости распыления и контролировать по кварцевому датчику, либо длительностью процесса распыления. Толщина полученных структур составляла ~ 100 нм.

После осаждения часть образцов была подвергнута отжигу в вакуумной камере при температуре 650°C в течение 30 мин.

Толщины пленок были определены с помощью профилометра, а их элементный состав — методом Оже-электронной спектроскопии. Спектры фотолюминесценции регистрировали при комнатной температуре с помощью Рамановского спектрометра. В качестве источника возбуждения использовали лазеры с длинами волн 405, 532 и 785 нм.

Структурные исследования образцов проводили методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) при ускоряющем напряжении 200 кВ. Для того чтобы охарактеризовать структуру исследуемых пленок и их фазовый состав измерены дифракционные картины с различных участков пленки. Результаты исследования методом просве-

чивающей электронной микроскопии высокого разрешения приведены на рис. 1.

Дифракционная картина пленки до отжига (рис. 1, *a*) содержит широкие диффузные кольца, на которых присутствуют отдельные рефлексы. Такая картина дифракции от выбранной области говорит о том, что полученная исходная пленка оксида титана является аморфно-кристаллической, причем кристаллическая фаза имеет небольшой размер зерна. У наблюдаемых кристаллов нет выделенной ориентации, на что указывает практически равномерное распределение контраста в разных направлениях кристаллических плоскостей на дифракционной картине. Данные кристаллиты можно наблюдать на ПЭМ-изображениях исходной пленки с высоким разрешением: они имеют более темный контраст (рис. 1, *c*). Кристаллы имеют неправильную форму и неравномерно распределены по всей толщине пленки. Средний размер таких включений составляет 15...30 нм. Это позволяет сделать вывод о том, что в процессе магнетронного облучения имеют место процессы кристаллизации, однако низкая температура подложки не дает возможности сформироваться поликристаллической пленке.

В то же время дифракционная картина пленки после отжига при 680°C в течение 30 мин, содержит только отдельные яркие рефлексы (рис. 1, *b*). Широкие диффузные максимумы отсутствуют, что говорит о том, что после отжига при исследуемых условиях данная пленка имеет кристаллическую структуру. При выборе одиночных рефлексов, образующих элементарную ячейку (рис. 1, *b*), использовался протяженный участок пленки. Это позволяет сделать вывод, что в пленке оксида титана после отжига формируется монокристаллическая фаза. Дополнительным доказательством монокристалличности этих участков служат ПЭМ-изображения, полученные методом микроскопии высокого разрешения, с наблюдаемых участков (рис. 1, *d*). На них кристаллографические плоскости представляют собой сплошные непрерывающиеся линии, строго параллельные друг другу.

Результаты расчета дифракционной картины от монокристаллического участка пленки показали, что данные области соответствуют фазе анатаза. На рис. 1, *b* приведена дифракционная картина исследуемой пленки. Она представляет собой пересечение обратной решетки фазы анатаза (JCPDS 89-4921) с осью зоны [001].

Исследование спектров комбинационного рассеяния света показало, что после отжига в вакууме при температуре 650°C в течение 30 мин диоксид титана переходит в кристаллическое состояние преимущественно в аллотропном состоянии анатаза (рис. 2). Сразу после магнетронного напыления

пленка диоксида титана имеет аморфную структуру. Комбинационное рассеяние света от нее отсутствует, а в спектре проявляются только линии кремниевой подложки. После отжига происходит кристаллизация образца преимущественно в аллотропной модификации анатаза.

Для возбуждения фотолюминесценции центра Ti^{+3} — вакансии кислорода [10] в ближней ИК области спектра был выбран лазер с длиной волны излучения 785 нм. Спектр фотолюминесценции исследуемого образца, отожженного при температуре 650 °С, представлен на рис. 3. Полоса 1,09...1,42 эВ с максимумом вблизи 1,24 эВ ($\lambda = 1003$ нм) обусловлена люминесценцией указанного выше центра. Понять природу наблюдаемой полосы излучения можно, если привлечь диаграмму электронных

переходов, которая изображена на вставке рис. 3, предложенную в работе [10] для дефекта, который возникает в результате взаимодействия иона Ti^{+3} и вакансии кислорода. Излучение при переходе с глубокого уровня в валентную зону наблюдалось ранее, при возбуждении оксида титана лазерами с меньшей длиной волны, которые были способны возбудить излучение с энергией фотонов 2,28 эВ [10]. Это излучение соответствовало переходам электронов с уровня дефекта в валентную зону полупроводника. Нами было обнаружено излучение при переходах из зоны проводимости на уровень дефекта с энергией фотонов 1,24 эВ. Этот результат был получен при использовании лазера с длиной волны 785 нм, который не мог возбудить полосу 2,28 эВ. Заметим, что сумма энергий излуча-

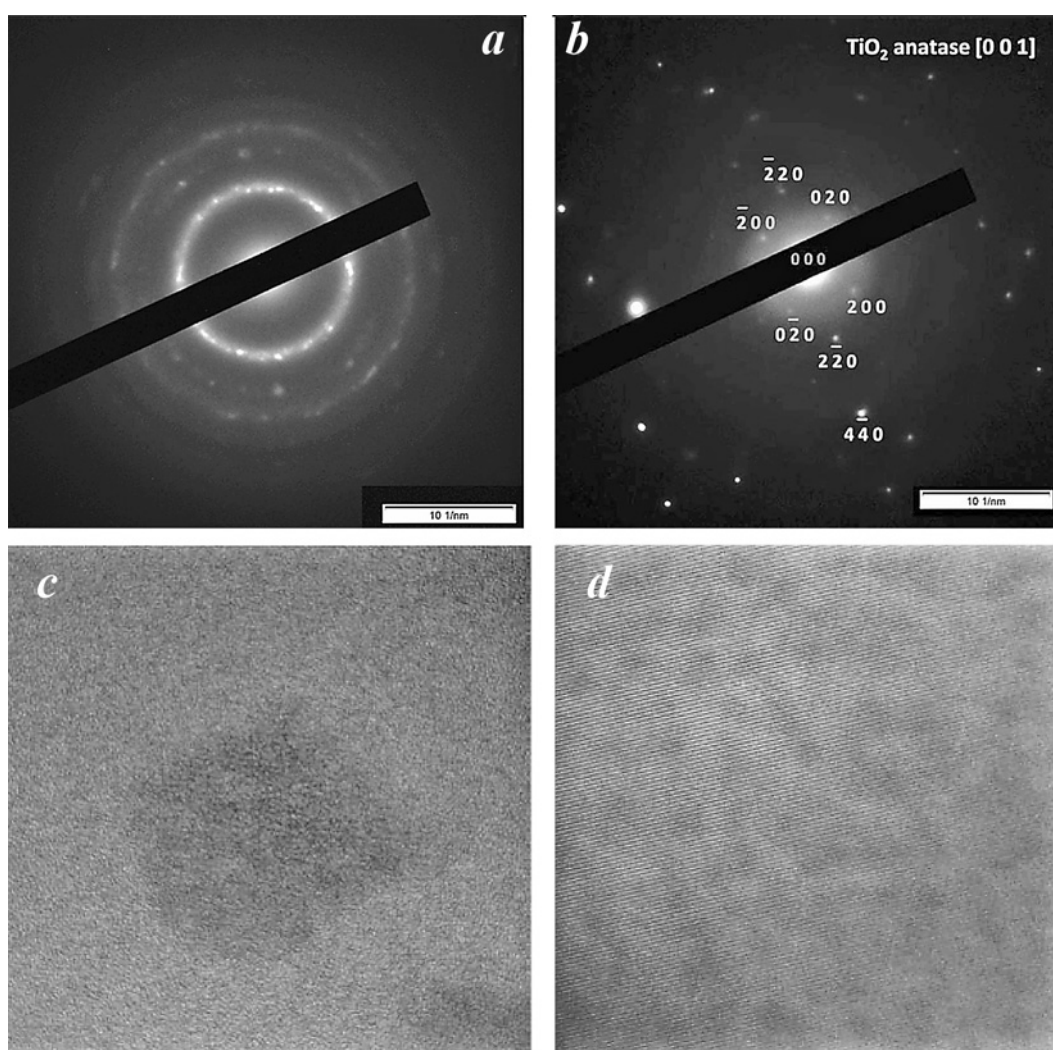


Рис. 1. Результаты исследования пленок диоксида титана методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ): *a* — дифрактограмма исходной пленки; *b* — дифрактограмма пленки после отжига; *c* — ПЭМ-изображение кристаллита диоксида титана исходной пленки с увеличением 800 000; *d* — ПЭМ-изображение пленки после отжига

Fig. 1. Results of the study of titanium dioxide films by transmission electron microscopy (TEM): *a* — diffractogram of the original film; *b* — diffractogram of the film after annealing; *c* — TEM-image of the crystallite of titanium dioxide of the original film with an increase of 800 000; *d* — TEM-image of the film after annealing

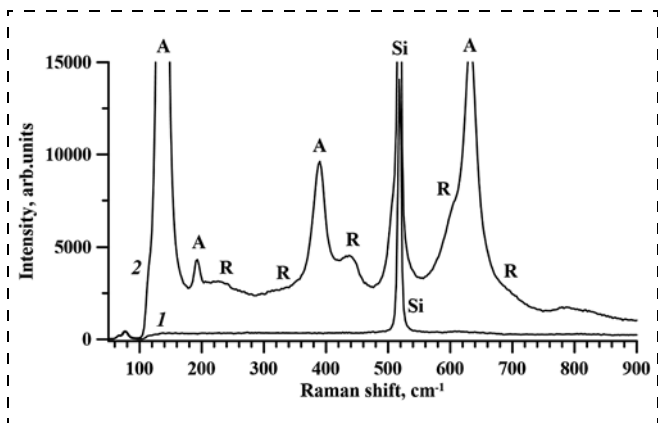


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния света диоксида титана. Возбуждение лазером с длиной волны 405 нм: 1 — образец сразу после магнетронного напыления; 2 — после отжига при температуре 650 °C в течение 30 мин; A — пики, относящиеся к анатазу; R — пики, относящиеся к рутилу; Si — пики, относящиеся к кремниевой подложке

Fig. 2. Raman spectra of titanium dioxide light. Excitation by a laser with a wavelength of 405 nm: 1 — sample immediately after magnetron sputtering; 2 — after annealing at a temperature of 650 °C for 30 min; A-peaks related to anatase; R-peaks related to rutile; Si-peaks related to silicon substrate

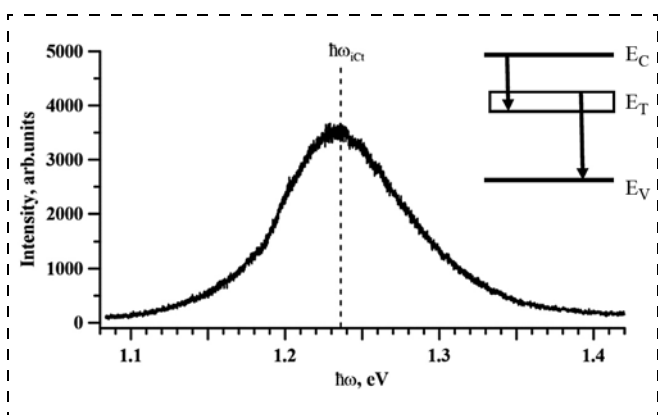


Рис. 3. Спектр фотолюминесценции диоксида титана, отожженного при температуре 650 °C (длина волны возбуждающего лазера 785 нм). На вставке схема излучательных оптических переходов

Фотолуминесценция диоксида титана в фазе анатаза — 3,52 эВ. Это показывает, что при отжиге пленка кристаллизуется. Монокристаллы не распространяются на всю поверхность пленки. Пленка является крупноблочной монокристаллической.

Исследование люминесценции также показывает, что после отжига образцы оксида титана кристаллизуются.

Заключение

Таким образом, в работе показано, что при отжиге в вакуумной камере при температуре 650 °C в

течение 30 мин аморфная пленка диоксида титана кристаллизуется преимущественно в форме анатаза и появляется полоса излучения с максимумом 1,24 эВ. Для наблюдения этой полосы TiO₂ необходимо возбуждать лазером с длиной волны 785 нм. В этом случае происходит возбуждение центра Ti³⁺ — вакансии кислорода [10]. Переходы с центра в валентную зону не возбуждаются, так как энергия квантов используемого лазера недостаточна. Последний переход достаточно хорошо описан в научной литературе [10] и создает полосу излучения с максимумом в красной области спектра и энергией максимума около 2,2 эВ. В сумме энергия этих двух переходов близка к ширине запрещенной зоны анатаза.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшей школы. Проект 0004-2019-0002.

Список литературы

1. Tang H., Prasad K., Sanjinés R., Schmid P. E., Lévy F. Electrical and optical properties of TiO₂ anatase thin films // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 75, N. 4. P. 2042–2049. DOI: 10.1063/1.356306.
2. Chao S., Wang W. H., Lee C. C. Low-loss dielectric mirror with ion-beam-sputtered TiO₂-SiO₂ mixed films // Appl. Opt. 2001. Vol. 40, N. 13. P. 2177–2182. DOI: 10.1364/AO.40.002177.
3. Yokogawa T., Yoshii S., Tsujimura A., Sasai Y., Merz J. Electrically pumped CdZnSe/ZnSe blue-green vertical-cavity surface-emitting lasers // J. J. Appl. Phys. 1995. Vol. 34. Part 2: Letters. № 6B. P. L751-3.
4. Fukuda H., Namioka S., Miura M., Ishikawa Y., Yoshino M., Nomura S. Structural and electrical properties of crystalline TiO₂ thin films formed by metalorganic decomposition // J. J. Appl. Phys. 1999. Vol. 38. Part 1. N. 10. P. 6034–6042. DOI: 10.1143/JJAP.38.6034.
5. Campbell S. A., Gilmer D. C., Wang X. C., Hsieh M. T., Kim H. S., Gladfelter W. L., Yan J. H. MOSFET transistors fabricated with high permittivity TiO₂ dielectrics // IEEE Trans. Electron Devices. 1997. Vol. 44, N. 1. P. 104–109. DOI: 10.1109/16.554800.
6. Fujishima A., Honda K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode // Nature. 1972. Vol. 238. P. 37–41. Doi: 10.1038/238037a0.
7. O'Regan B., Gratzel M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films // Nature. 1991. Vol. 353. P. 737–740.
8. Dutta P. K., Ginwalla A., Hogg B., Patton B. R., Chwieroth B., Liang Z., Gouma P., Mills M., Akbar S. Interaction of carbon monoxide with anatase surfaces at high temperatures: optimization of a carbon monoxide sensor // J. Phys. Chem. B. 1999. Vol. 103, N. 21. P. 4412–4422. Doi: 10.1021/jp9844718.
9. Xu Y., Yao K., Zhou X., Cao Q. Platinum-titania oxygen sensors and their sensing mechanisms // Sens Actuators B. 1993. Vol. 14. P. 492–499.
10. Zhang D., Ma X., Zhang H., Liao Y., Xiang Q. Enhanced photocatalytic hydrogen evolution activity of carbon and nitrogen self-doped TiO₂ hollow sphere with the creation of oxygen vacancy and Ti³⁺ // Materials Today Energy. 2018. Vol. 10. P. 132–140.

S. V. Bulyarsky, D. Sc., Professor, Chief Researcher, bulyar2954@mail.ru,
D. A. Koiva, Junior Researcher, dkoiva616@gmail.com, **E. A. Pershina**, Ph. D., Researcher,
Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 115487,
Russian Federation

Corresponding author:

Bulyarsky Sergey V., D. Sc. Professor, Chief Researcher, bulyar2954@mail.ru, Institute of Nanotechnology
of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 115487, Russian Federation

The Formation of Semiconductor Titanium Dioxide Thin Films by RF Magnetron Sputtering

Received on October 08, 2019

Accepted on October 15, 2019

The authors presents the developed of technology for obtain of titanium dioxide thin films by RF magnetron sputtering of a titanium target in argon and oxygen atmosphere. Vacuum annealing of the films after the deposition made it possible to receive large-block single-crystal films of titanium dioxide in the anatase phase. The high-resolution Transmission Electron Microscopy, Raman scattering and investigation of luminescence properties confirms the single crystallinity of those films.

Keywords: titanium dioxide, anatase, Transmission Electron Microscopy, Raman scattering, luminescence, oxygen vacancy

For citation:

Bulyarsky S. V., Koiva D. A., Pershina E. A. The Formation of Semiconductor Titanium Dioxide Thin Films by RF Magnetron Sputtering, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 12, pp. 720—726.

DOI: 10.17587/nmst.21.720—726.

Introduction

Titanium dioxide (TiO_2) is a technologically important semiconductor material because it has a large number of unique properties: wide bandgap [1], high refractive index [2, 3], and high dielectric constant [4, 5]. According to this, optical and photochemical properties of titanium dioxide thin films are important [6, 7]. In addition, possessing semiconductor properties this material can be used as a sensor for control of the air-fuel mixes in the automobile engines [8, 9]. High dielectric constant gives the more opportunities for application of TiO_2 in electronics, for example, as a capacitor and a memory device.

Titanium dioxide has a wide area of homogeneity, therefore, the defects of oxygen vacancy are played an important role. One of such defects is Ti^{+3} recombination center — oxygen vacancy [10], which can be used for the photocatalysis.

An important area is the development of a technology of obtaining of the titanium dioxide nanostructures and the research of methods of modification their properties. The main targer of this work is to obtain of the crystalline titanium dioxide thin films of an anatase phase and research of their properties.

1. Results of experiments and their discussion

The formation of films was carried out by deposition of titanium oxide on thermally oxidized *n*-type

monocrystalline silicon wafers ($\rho_s \sim 0.001...0.005 \Omega \cdot \text{cm}$) with a thickness of 460 mm. The oxide thickness is 1.7 microns. At the preparation stage, the entire series of substrates was hydromechanically cleaned on the DNS Screen wafer cleaning machine.

For the deposition of thin films, high-frequency magnetron sputtering was used, which made it possible to obtain films of a desired chemical composition, including stoichiometric. The distance between the target and the substrate for all experiments was fixed at 45 mm. The deposition of a thin film of TiO_2 was carried out from a target of metallic titanium with a purity of 99.97 % in gas mixture of argon with oxygen in a certain proportion. Before deposition of films onto the substrate, the target was pre-sputtering onto a special shutter in order to remove the oxide layer formed during the previous processes.

The residual pressure in the vacuum chamber was $4 \cdot 10^{-7}$ Torr. The deposition was carried out at working pressure of $2 \cdot 10^{-3}$ Torr in argon/oxygen atmosphere. The supply of process gases to the chamber was carried out using two automatic mass flow controllers, with an accuracy of maintaining the gas mixture of ± 0.8 %, which made it possible to set the concentration of gases in the working gas mixture argon-oxygen with an accuracy of ± 1.6 %. The Ar/O_2 relation was 20:5 sccm. The power of magnetron during the process was about of 200 W.

The thickness of the formed thin-film structures can be adjusted either by setting the deposition rate and monitored by a quartz sensor, or by the duration of the deposition process. The thickness of the received structures was ~100 nm.

After the deposition, some of the samples were determined to annealing in the vacuum chamber at the temperature of 650 °C during 30 min.

The thicknesses of films were measured by a profilometer, and their element composition — by the method of Auger-electron spectroscopy. The photoluminescence spectra were recorded at a room temperature by a Raman spectrometer. As a source of excitement, the lasers with the wavelengths of 405, 532 and 785 nm were used.

The structural properties of the samples were measured by the transmission electron microscopy (TEM) at the accelerating voltage of 200 kV. For the characterization of the phase structure of thin films the diffraction pictures were measured from various sites of a film. The results of investigations by the high resolution transmission electron microscopy method are presents in the fig. 1.

The diffraction pattern of the film before annealing (fig. 1, *a*) contains wide diffusion rings, on which there are separate reflections. Such a diffraction pattern from the selected area means that the obtained initial titanium dioxide thin film is amorphous-crystalline, while the crystalline phase has a small grain size. The observed crystals do not have main orientation, which indicates an almost uniform distribution of contrast between the crystal planes in the diffraction pattern. These crystallites can be observed on TEM images of the initial high-resolution film: they have a darker contrast (fig. 1, *c*). The crystals are irregular in shape and unevenly distributed throughout the film thickness. The average size of such inclusions is 15...30 nm. This allows us to conclude that crystallization processes occur during the magnetron deposition process, however, the low temperature of the substrate prevents the formation of a polycrystalline film.

At the same time, the diffraction pattern of the film, but after annealing at 680 °C during 30 minutes, contains only individual bright reflections (fig. 1, *b*). There are have not a wide diffusion maxima, which means that after annealing under the investigated conditions, this film has a crystalline structure. When the individual reflections forming the unit cells were isolated (fig. 1, *b*), the wide part of the film was used. This allows us to conclude that the after annealing the titanium dioxide film have a single crystalline phase. In addition of the monocrystallinity of these thin films are observed on TEM images obtained by high resolution microscopy method (fig. 1, *d*). On these pictures, the crystallo-

graphic planes are contains from continuous lines which are parallel to each other.

The results of a calculation the diffraction pattern in the single-crystal part of the film shown that these regions correspond to the anatase phase. The diffraction pattern of the film is shown in fig. 1, *b*. It represents by intersection of the reciprocal lattice of the anatase phase (JCPDS 89-4921) with the axis [001].

After annealing in vacuum at the temperature of 650 °C during 30 min the titanium dioxide switch to a crystalline phase, mainly in the allotropic state of anatase (fig. 2) it was demonstrate on the Raman scattering spectrum.

One the other hand the titanium dioxide has an amorphous structure right after the deposition. It is not possible to observe the pick of Raman scattering from TiO₂ thin film, and only picks from the silicon substrate appear in the spectrum. After annealing the sample goes to the crystalline state, in the allotropic form of the anatase.

The laser with the wavelength of 785 nm was chosen for the excitement of the photoluminescence Ti⁺³ center — oxygen vacancy [10] in the near IR area of the spectrum. The spectrum of the photoluminescence of the sample, annealed at the temperature of 650 °C, is presented in fig. 3. The bandgap of 1.09...1.42 eV with the maximum close to 1.24 eV ($\lambda = 1003$ nm) is determined by the luminescence center which shown above. It is possible to understand the nature of the observed band of radiation, if we look at the diagram of the electron transitions presented in the insert of the fig. 3 proposed in the work [10] for the defect, which is the results from interaction of Ti⁺³ ions with the oxygen vacancy. Earlier, the radiation during the transition from a deep level to the valence band was observed, when the titanium dioxide was excited by the lasers with the smaller wavelengths, capable to excite radiation with the energy of photons of 2.28 eV [10]. This radiation corresponded to the transitions of the electrons from the defect level to the valence band of a semiconductor. We discovered radiation during transitions from the conductive level to the defect level with the energy of the photons of 1.24 eV. This result was obtain with the use of the laser with the wavelength of 785 nm, which could not excite of the band of 2.28 eV. We should point out that the sum of the energies of the radiative transitions is equal to the width of the band gap of the titanium dioxide films in the anatase phase — 3.52 eV. This means that during annealing the titanium dioxide thin films become to a crystalline. The monocrystals do not extend to the all of the surface of the film. This is a large-block and single-crystal film.

The research of the luminescence also demonstrates that the titanium dioxide thin film become to a crystalline after annealing of the samples.

Conclusion

Thus, the work demonstrates that the amorphous film of the titanium dioxide thin film become to a crystalline mainly in the form of anatase after annealing in the vacuum chamber at the temperature of 650 °C for 30 min. The amorphous film of the titanium dioxide become to the allotropic form of anatase, and a radiative band appears with the maximum of 1.24 eV. For observation of this band of TiO₂ is necessary to excitations by a laser with the wavelength of 785 nm. In this case the Ti³⁺ center — vacancy of oxygen is excited [10]. The transitions from the center to the valence band are not excited, because the energy of the quanta of the employed laser is insufficient. The latter transition is described rather well in the scientific literature [10] and it creates a radiative band with the maximum in the red area of the spectrum and energy of the maximum of about 2.2 eV. The total energy of these two transitions is close to the width of the bandgap of the anatase.

The work was done with support of the Ministry of Science and Higher Education. Project 0004-2019-0002.

References

1. Tang H., Prasad K., Sanjinés R., Schmid P. E., Lévy F. Electrical and optical properties of TiO₂ anatase thin films, *J. Appl. Phys.*, 1994, vol. 75, no. 4, pp. 2042–2049. DOI: 10.1063/1.356306
2. Chao S., Wang W. H., Lee C. C. Low-loss dielectric mirror with ion-beamsputtered TiO₂-SiO₂ mixed films, *Appl. Opt.*, 2001, vol. 40, no. 13, pp. 2177–2182. DOI: 10.1364/AO.40.002177
3. Yokogawa T., Yoshii S., Tsujimura A., Sasai Y., Merz J. Electrically pumped CdZnSe/ZnSe blue-green vertical-cavity surface-emitting lasers, *J. J. Appl. Phys.*, 1995, vol. 34, part 2: Letters, no. 6B, pp. L751-3.
4. Fukuda H., Namioka S., Miura M., Ishikawa Y., Yoshino M., Nomura S. Structural and electrical properties of crystalline TiO₂ thin films formed by metalorganic decomposition, *J. Appl. Phys.*, 1999, vol. 38, part 1, no. 10, pp. 6034–6042. DOI: 10.1143/JJAP.38.6034.
5. Campbell S. A., Gilmer D. C., Wang X. C., Hsieh M. T., Kim H. S., Gladfelter W. L., Yan J. H. MOSFET transistors fabricated with high permittivity TiO₂ dielectrics, *IEEE Trans. Electron Devices*, 1997, vol. 44, no. 1, pp. 104–109. DOI: 10.1109/16.554800.
6. Fujishima A., Honda K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode, *Nature*, 1972, vol. 238, pp. 37–41. DOI: 10.1038/238037a0.
7. O'Regan B., Gratzel M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films, *Nature*, 1991, vol. 353, pp. 737–740.
8. Dutta P. K., Ginwalla A., Hogg B., Patton B. R., Chwieroth B., Liang Z., Gouma P., Mills M., Akbar S. Interaction of carbon monoxide with anatase surfaces at high temperatures: optimization of a carbon monoxide sensor, *J. Phys. Chem. B.*, 1999, vol. 103, no. 21, pp. 4412–4422. DOI: 10.1021/jp9844718.
9. Xu Y., Yao K., Zhou X., Cao Q. Platinum-titania oxygen sensors and their sensing mechanisms, *Sens Actuators B.*, 1993, vol. 14, pp. 492–499.
10. Zhang D., Ma X., Zhang H., Liao Y., Xiang Q. Enhanced photocatalytic hydrogen evolution activity of carbon and nitrogen self-doped TiO₂ hollow sphere with the creation of oxygen vacancy and Ti³⁺, *Materials Today Energy*, 2018, vol. 10, pp. 132–140.

УДК 621.315.592

DOI: 10.17587/nmst.21.726-737

А. В. Войцеховский¹, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф., e-mail: vav43@mail.tsu.ru,
Н. А. Кульчицкий², д-р техн. наук, проф., e-mail: n.kulchitsky@gmail.com,
С. Н. Несмелов¹, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., **С. М. Дзядух**¹, канд. физ.-мат. наук,
ст. науч. сотр., **Д. И. Горн**¹, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
² Государственный научный центр РФ АО "НПО "Орион", г. Москва

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ УНИПОЛЯРНЫХ БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ И РТУТИ

Поступила в редакцию 15.10.2019

Проанализировано современное состояние исследований в области создания униполярных барьерных структур на основе молекулярно-лучевой эпитаксии n-HgCdTe для инфракрасных детекторов с пониженными темновыми токами. Показано, что барьерные структуры типа nВп представляют собой альтернативу для создания фотодиодных приемников излучения среднего и дальнего инфракрасного диапазона. Рассмотрены основные пути минимизации барьера для дырок в валентной зоне фоточувствительной структуры на основе теллурида кадмия и ртути n-типа проводимости.

Ключевые слова: униполярная структура, барьерная структура, HgCdTe, КРТ, МЛЭ, nВп, ИК фотодиод, фотоприемное устройство

Введение

Необходимость разработки фотоприемных устройств третьего поколения предъявляет повышенные требования к инфракрасным (ИК) детекторам. Среди основных направлений в области улучшения рабочих характеристик фоточувствительных приборных структур ИК диапазона можно выделить повышение рабочей температуры, снижение стоимости, массы и габаритных размеров приборов [1, 2]. Полупроводниковый твердый раствор HgCdTe (теллурид кадмия и ртути, КРТ) является идеальным материалом для создания ИК детекторов. Это обусловлено, во-первых, зависимостью ширины запрещенной зоны от содержания CdTe, во-вторых, большими оптическими коэффициентами поглощения, следствием чего являются большие значения квантовой эффективности, в-третьих, механизмами рекомбинации, обеспечивающими большее время жизни носителей заряда и высокую рабочую температуру, и, в четвертых, крайне слабой зависимостью постоянной решетки от состава (что позволяет выращивать высококачественные многослойные гетероструктуры).

Благодаря перечисленным свойствам HgCdTe широко применяют при разработках высокочувствительных ИК детекторов для различных спектральных областей [3]. Матрицы фокальной плоскости для среднего (MWIR) и дальнего (LWIR) спектральных диапазонов обычно имеют гибридную архитектуру: фотосенсор на основе $p-n$ -фотодиодов из HgCdTe совмещается с кремниевой считывающей схемой. Рабочие температуры детекторов, при которых возможна реализация режима ограничения пороговых характеристик шумами фонового излучения, определяют генерационно-рекомбинационными механизмами в HgCdTe, определяющими темновые токи (шумы). Для подавления темновых токов приходится охлаждать чувствительные элементы фотоприемных устройств до достаточно низких температур (например, до 77 К при LWIR-детектировании). Ключевым условием для создания высокотемпературного детектора является минимизация тепловой генерации в активной области без снижения квантовой эффективности. Среди всех механизмов тепловой генерации-рекомбинации (ГР) в узкозонных полупроводниках решающую роль играют межзонные оже-процессы (Оже 1 и Оже 7, имеющие наименьшие пороговые энергии), а также ГР по механизму Шокли—Рид—Холла (ШРХ) через уровни ловушек. Излучательная рекомбинация обычно не ограничивает характеристики правильно спроектированных детекторов [4].

Барьерные структуры

Дальнейший прогресс инфракрасных детекторов на HgCdTe связан с развитием таких технологий получения материала, как молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и газофазная эпитаксия из металл-органических соединений (ГФЭМОС, МОСVD). Эти технологии позволяют выращивать пленки с прецизионно управляемым распределением компонентного состава и концентрации легирующей примеси по толщине. Это предоставляет возможности разработок новых архитектур приборных структур, обеспечивающих, например, повышение рабочей температуры детекторов и упрощение технологического цикла их изготовления [5]. К настоящему моменту предложено множество различных архитектур барьерных детекторов на основе HgCdTe, среди которых при использовании метода МЛЭ самыми перспективными представляются униполярные конфигурации (nBn - и NBn -структуры), позволяющие упростить технологию получения детекторов и снизить темновые токи [6].

В 2006 г. предложена концепция барьерной фоточувствительной структуры [7], которую конструктивно часто сравнивают с классическим $p-n$ -фотодиодом. Различия заключаются в том, что область пространственного заряда (ОПЗ) $p-n$ -перехода заменена барьерным (широкозонным) слоем B , а p -область — контактным слоем n -типа. Во втором n -слое происходит поглощение излучения. За счет введения широкозонного барьера при подаче на структуру отрицательного смещения (отрицательный потенциал приложен к контактному слою) возникает потенциальный барьер для электронов (происходит подавление темновых токов основных носителей заряда), но при этом отсутствует барьер для неосновных носителей заряда (дырок), возникших в результате фотогенерации [8]. Введение барьерного слоя вместо ОПЗ $p-n$ -фотодиода снижает вклад в темновой ток компонентов, связанных с процессами ШРХ, а также с поверхностной утечкой.

Концепция nBn -структур была предложена (и впервые реализована на практике) для детекторов на основе InAs-соединений (группа A^3B^5) с разрывом зон на гетерограницах второго типа. Предложенная структура состояла только из слоев n -типа проводимости с нелегированным барьером из InAsSb (или AlAsSb) [9]. Особенностью таких детекторов является почти нулевой разрыв валентной зоны на гетерогранице барьера и контактного слоя при большой высоте барьера (>1 эВ) в зоне проводимости. Разработки nBn -детекторов на основе InAs-соединений активно продолжают [10, 11]. Теоретически показано, что nBn -детекто-

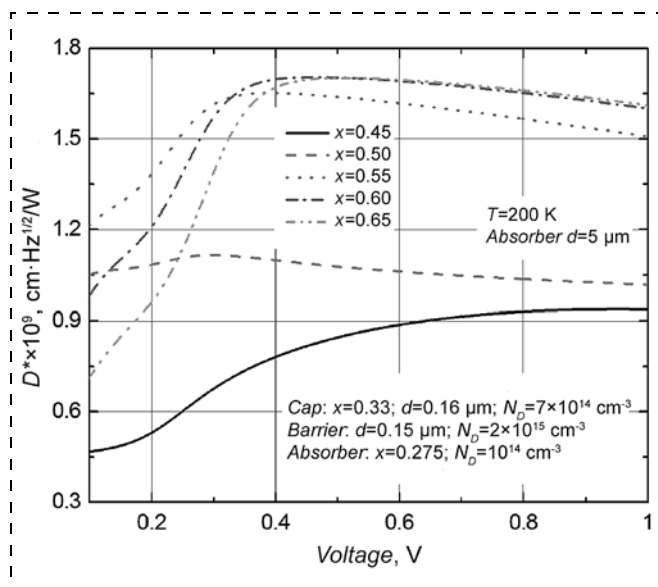


Рис. 1. Рассчитанные зависимости обнаружительной способности D^* от внешнего смещения для барьерной фоточувствительной $nB_n n$ -структуры при температуре 200 К при различных значениях состава центрального слоя барьера [15]

Fig. 1. Calculated dependences of the detectivity D^* on the external voltage for the barrier photosensitive $nB_n n$ -structure at the temperature of 200 K at various values of the composition of the central layer of the barrier [15]

ры на основе соединений группы A^3B^5 при полной реализации их потенциальных преимуществ способны конкурировать с традиционными детекторами из HgCdTe [12].

В настоящее время распространено создание на основе МЛЭ HgCdTe-фотодиодов типа n на p путем имплантации в эпитаксиальную пленку ионов бора (без отжига), а также фотодиодов типа p на n посредством имплантации ионов мышьяка и последующего активационного отжига. Для HgCdTe также перспективно использование nBn -архитектуры. Это может обеспечить значительное преимущество перед традиционными фотодиодами (а также двухслойными планарными гетеропереходами — DLPH) в силу повышения качества материала в отсутствие постимплантационных дефектов [13, 14]. Исключение необходимости проведения ионной имплантации (иногда с последующим отжигом) упростит технологию создания детекторов. Но при реализации nBn -архитектуры в HgCdTe возникает проблема, связанная с тем, что для гетерограниц барьерного слоя в HgCdTe характерен первый тип расположения энергетических зон, что подразумевает ненулевой разрыв валентной зоны. Такой разрыв зон препятствует току фотоносителей.

Для решения этой проблемы предлагалось увеличивать напряжение смещения на структуре. В работе [15] было проведено численное моделирование энергетических диаграмм фоточувстви-

тельной $nB_n n$ -структуры с поглощающим слоем $Cd_{0,275}Hg_{0,725}Te$, рассчитанным на среднюю ИК область, и со сложным трехслойным барьером, включающим центральный слой с $Cd_{0,6}Hg_{0,4}Te$ и два окружающих его слоя с переменным составом. На рис. 1 показаны рассчитанные зависимости обнаружительной способности от значения внешнего смещения при температуре 200 К. Здесь N_D — концентрация донорной примеси в соответствующем слое структуры.

Из представленных на рис. 1 кривых видно, что барьерные слои с большим составом обеспечивают лучшие значения обнаружительной способности прибора, что объясняется более эффективным экранированием тока основных носителей заряда в структуре более широкозонным барьером. При этом наличие барьера для дырок в валентной зоне обуславливает низкие значения обнаружительной способности при нулевом внешнем смещении. При увеличении отрицательного внешнего смещения геометрия потенциальных барьеров претерпевает существенные изменения как для электронов, так и для дырок. При увеличении смещения высота барьера для дырок становится меньше, что уменьшает барьер для тока неосновных носителей и приводит к увеличению обнаружительной способности. Однако при слишком больших значениях смещения ($\sim 0,4$ В) существенным становится изменение геометрии барьера в зоне проводимости: его форма стремится к треугольной, возрастает туннельная прозрачность барьера и уменьшается эффективность экранирования тока основных носителей, что приводит к последующему снижению значений обнаружительной способности (рис. 2). Здесь E_c , E_v — энергии краев зоны проводимости и валентной зоны; E_f — энергия уровня Ферми, а $E_{f,n}$ и $E_{f,p}$ — энергии неравновесных квазиуровней Ферми. Сходные результаты получены также и другими авторами [16, 17].

Структуры с барьерами p -типа

Другим подходом к минимизации разрыва валентной зоны является создание барьера p -типа проводимости. В работе [8] показана возможность практически полного устранения барьера для дырок (при определенном смещении) путем прецизионного акцепторного легирования барьерной области. Такой подход малоперспективен при использовании МЛЭ и возможен только при выращивании гетероструктур методом MOCVD [18], который позволяет получать *in situ* материал как донорного, так и акцепторного типов проводимости. Кроме этого, формирование барьерного слоя p -типа приведет к возникновению ОПЗ вблизи ге-

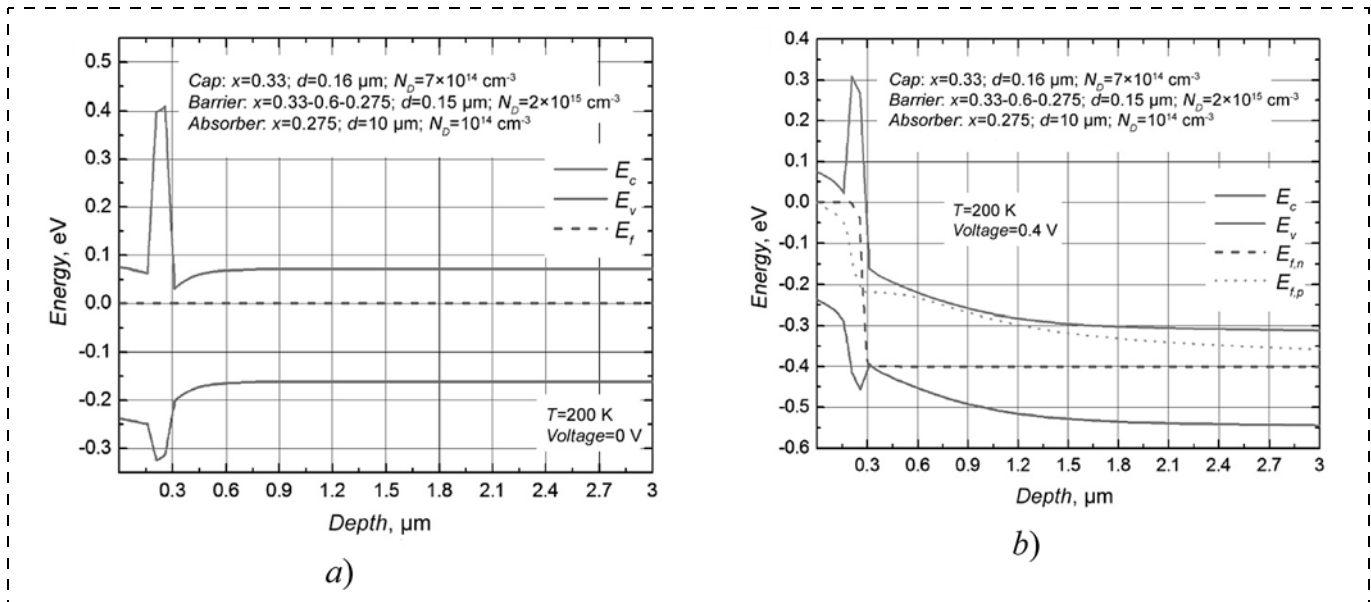


Рис. 2. Энергетические диаграммы барьерной фоточувствительной nB_n -структуры при температуре 200 К при отсутствии (а) и наличии (б) смещения [15]

Fig. 2. Energy diagrams of the barrier photosensitive nB_n -structure at the temperature of 200 K in absence (a) and presence (b) of a bias [15]

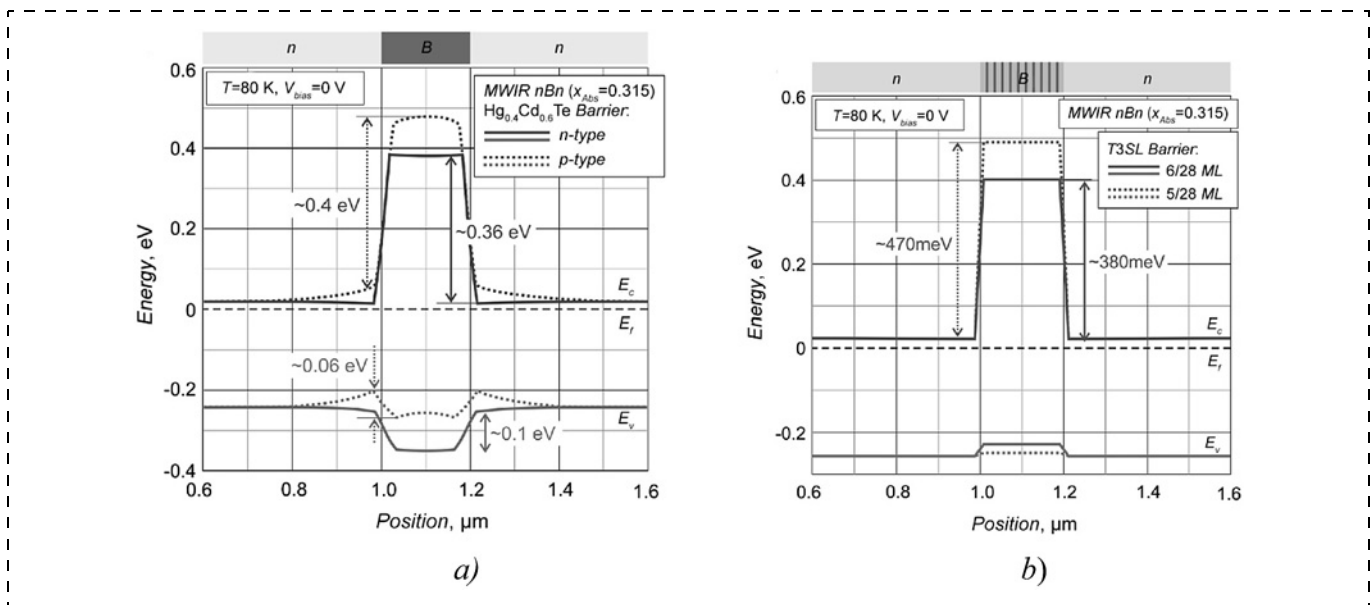


Рис. 3. Рассчитанные зонные диаграммы структур с поглощающим слоем из КРТ с $x = 0.315$ с барьерами n - и p -типов (а) и с барьером в виде сверхрешетки (б) при температуре 80 К при нулевом внешнем смещении (V_{bias}) [19]

Fig. 3. Calculated band diagrams of the structures with the barriers of n - and p -types (a) and with a barrier in the form of a superlattice (b) at the temperature of 80 K at a zero external voltage [19]

терограниц барьерного слоя, что вызовет интенсивную генерацию по механизму ШРХ. Поэтому преимущество использования барьера, легированного акцепторной примесью, не является очевидным.

Структуры со сверхрешеточными барьерами

Для метода МЛЭ лучше подходит направление, связанное с использованием многослойных барьеров, включая барьеры в виде сверхрешеток [19]. На

рис. 3, а показана рассчитанная зонная диаграмма аналогичной структуры, у которой роль барьера выполняют однородные слои n - и p -типов проводимости. Здесь E_c , E_v — энергии краев зоны проводимости и валентной зоны; E_f — энергия уровня Ферми. Расчет энергетической зонной диаграммы структуры, в которой роль барьера выполняет сверхрешетка (ТЗСЛ) $HgTe/Cd_{0,95}Hg_{0,05}Te$. Толщина слоев $Cd_{0,95}Hg_{0,05}Te$ во всех рассматриваемых

авторами случаям составляла 28 нм, а толщины слоев HgTe при проведении расчетов варьировались. Моделирование показало, что в такой системе при толщине слоев HgTe 5 нм полностью устраняется потенциальный барьер в валентной зоне без образования ОПЗ (рис. 3, *b*, кривые 5/28). К сожалению, авторы не дают информацию о том, какое число периодов сверхрешетки они закладывали при расчетах.

Дальнейшее развитие этот подход получил в работе [20]. Расчеты, проведенные с учетом квантово-механической природы сверхрешетки в барьерном слое, показали, что при толщинах барьеров CdTe и ям HgTe, равных 1,3 и 3,7 нм соответственно, достигается максимальное отношение дырочного тока к электронному, если число слоев в сверхрешетке превышает 12 [21]. Также в работах этой группы теоретически показано, что снижение барьера в валентной зоне возможно при неоднородном распределении состава и легирующей примеси в барьерном слое [22]. Экспериментально эти способы снижения барьера в валентной зоне детально проработаны не были.

Другой проблемой *nVn*-детекторов на основе HgCdTe является недостаточная высота потенциального барьера для электронов (менее 1 эВ), что увеличивает вероятность туннелирования электронов через барьер или его надбарьерного преодоления. Для решения этой проблемы необходим тщательный подбор толщины барьера, концентрации легирующей примеси в контактном слое [23]. Важными задачами при изготовлении *nVn*-структур является устранение токов поверхностной утечки, а также выбор правильной конфигурации контактов [8].

Экспериментальные образцы *nVn*-детекторов из HgCdTe

Несмотря на значительное число публикаций (около 100), посвященных теоретическому обоснованию потенциальных преимуществ *nVn*-структур, известны только единичные попытки практической реализации *nVn*-детекторов из HgCdTe. Впервые *nVn*-детекторы на основе HgCdTe с граничной длиной волны 5,7 мкм при 77 К были выращены методом МЛЭ (система Ribet 32 МВЕ) на подложке из объемного CdZnTe [23, 24]. Авторами было установлено, что вольт-амперная характеристика (ВАХ) определяется формой барьера и зависит от приложенного смещения. В диапазоне температур 180...250 К наблюдали диффузионное ограничение темного тока (плотность тока составила 1–3 А/см²), при более низких температурах ток был ограничен генерацией через поверхност-

ные ловушки. Фотоотклик зависит от приложенного смещения. Согласно оценкам, максимальная внутренняя квантовая эффективность составила 66 %. Авторы не приводят абсолютных значений спектральной чувствительности, что затрудняет оценку качества прибора. При второй разработке HgCdTe *nVn*-структуры с помощью метода МЛЭ получены значительно меньшие (примерно на 5 порядков) значения плотности темного тока ($3,74 \cdot 10^{-6}$ А/см² при температуре 77 К и смещении 0,5 В) [25]. Такой разброс результатов свидетельствует о необходимости систематических исследований для оптимизации параметров структур и технологических процессов.

Научной группой из Франции также была предпринята попытка создания MWIR *nVn*-структуры на основе МЛЭ HgCdTe с асимметричным барьерным слоем и однородным легированием [26]. Несмотря на то что квантовая эффективность согласно оценкам достигала 60 %, наблюдали большие значения плотности тока при 77 К (около 10^{-3} А/см²). ВАХ имели вид, который значительно отличался от предсказанного в результате моделирования, а исследования с помощью масс-спектрокопии вторичных ионов показали, что реальное распределение состава по толщине пленки значительно отличается от запланированного.

Группой Istuno A. (США) была предпринята попытка создания планарной LWIR *nVn*-структуры, для которой наблюдали высокие значения плотности темного тока (около 50 А/см² при 77 К). Освещение приводило к незначительному увеличению тока при обратном смещении. Авторы объяснили результаты наличием токов поверхностной утечки. Значения плотности тока для изготовленных MWIR и LWIR *nVn*-структур на несколько порядков превышают значения, предсказанные выражением для темного тока ИК детекторов "Rule07" [27], что может свидетельствовать о больших токах утечки по периметру структуры вследствие недостаточного качества пассивации.

Структуры с неравновесным обеднением

Одним из способов подавления Оже-процессов, не требующим охлаждения полупроводника, является создание неравновесного обеднения [28]. Темновые токи, определяющие рабочую температуру высокочувствительных ИК детекторов на основе HgCdTe, ограничены процессами Оже-генерации. Нетривиальной задачей является снижение требований к охлаждению детекторов без ухудшения рабочих характеристик. Концепция высокотемпературных (НОТ) структур основана на подавлении Оже-ГР-процессов путем снижения тепловой

концентрации носителей заряда в поглощающем слое до значений, которые меньше равновесных. В HOT детекторах используется слаболегированный узкозонный поглощающий слой, с одной стороны которого формируется гетеропереход, обеспечивающий эксклюзию носителей заряда, а с другой стороны формируется гетеропереход, обеспечивающий экстракцию носителей заряда. При подаче обратного смещения происходит уменьшение концентрации носителей заряда в поглощающем слое, что проявляется в подавлении Оже-процессов. Проведенные расчеты пороговых характеристик показали, что для HOT MWIR-детекторов ограничения шумами фонового излучения реализуется при температуре 203 К (по сравнению с температурой 155 К для идеального DLPN-детектора), а для LWIR-детектора — при 145 К (102 К для DLPN-детектора). Темновой ток в таких HOT структурах согласно расчетам меньше, чем в фотодиодах с $p-n$ -переходами [29], а рабочие характеристики при заданной температуре лучше. В настоящее время разрабатываются LWIR HOT барьерные структуры на основе MOCVD HgCdTe, содержащие p -слои, для быстродействующего детектирования при температуре 230 К (достигнута обнаружительная способность, равная $2 \cdot 10^9$ см \cdot Гц 0,5 /Вт) [4, 30]. Разработки HOT барьерных структур на основе МЛЭ HgCdTe пока в литературе не описаны.

Структуры с архитектурой NBuN-типа

Еще одной перспективной архитектурой униполярных барьерных детекторов на основе МЛЭ n -HgCdTe является NBuN-конфигурация, позволяющая повысить рабочую температуру детекторов за счет подавления Оже-ГР-процессов. Теоретически HgCdTe детекторы с NBuN-архитектурой сохраняют технологические преимущества nBn -конфигурации, но при этом могут показывать меньшие темновые токи, чем $p-n$ -фотодиоды и nBn -детекторы. NBuN-прибор содержит четыре слоя n -типа: высоколегированный покрывающий, слаболегированный барьерный, слаболегированный поглощающий и высоколегированный нижний. Разрыв зоны проводимости на границе поглощающего и барьерного слоев препятствует току электронов из покрывающего к поглощающему слою. В равновесных условиях существует барьер в валентной зоне на границе барьерного и поглощающего слоев, который блокирует перенос дырок в направлении покрывающего слоя. При подаче обратного смещения барьер в валентной зоне уменьшается. В результате дырки, возникающие в поглощающем слое вследствие тепловой и оптической генерации, собираются в верхнем слое. Граница между погло-

щающим и барьерным (или покрывающим) слоями обеспечивает экстракцию дырок, а граница между поглощающим и нижним слоями — эксклюзию. В результате термогенерированные дырки эффективно удаляются из поглощающего слоя, концентрация дырок становится значительно ниже равновесных значений. Для сохранения электронейтральности в поглощающем слое концентрация электронов тоже снижается ниже равновесного значения. ГР-процессы по Оже-механизму подавляются в силу уменьшения общей концентрации носителей в активном слое. Согласно результатам моделирования использование NBuN-конфигурации позволяет снизить значения темнового тока, увеличить обнаружительную способность и рабочую температуру (по сравнению с nBn и DLPN), а также исключить технологическую проблему формирования областей p -типа.

Авторами работы [25] было проведено моделирование характеристик ИК детекторов на основе HgCdTe с NBuN-архитектурой. Расчетные значения плотности темнового тока детекторов для MWIR и LWIR-диапазонов на порядок (или больше) ниже, чем для nBn или DLPN-детекторов в диапазоне температур 50...225 К. Расчетные значения пиковой обнаружительной способности (D^*) для MWIR-детектора составили $6,01 \cdot 10^{14}$ и $2,36 \cdot 10^{10}$ см \cdot Гц 0,5 /Вт при температурах 95 и 225 К соответственно. Значения D^* для LWIR-детектора составили $2,37 \cdot 10^{14}$ и $2,27 \cdot 10^{11}$ см \cdot Гц 0,5 /Вт при 50 и 95 К соответственно. Значения обнаружительной способности оценивали из максимальной чувствительности, рассчитанной в более ранних работах [31, 32].

Заключение

На основании проведенного обзора можно заключить, что исследования униполярных структур на основе МЛЭ n -HgCdTe перспективны и могут привести к созданию прорывной технологии для ИК детекторов. Несмотря на определенный теоретический задел, практической реализации приборов препятствует большое число нерешенных фундаментальных, конструктивных и технологических задач. Наличие барьера для дырок в валентной зоне в структурах nBn на основе материала КРТ требует ряда технологических решений, которыми являются использование больших значений внешнего смещения, управление параметрами барьерного слоя, включая акцепторное легирование барьера, а также использование многослойных структур со сложной конструкцией барьерного слоя, включая барьеры в виде сверхрешеток.

Исследования проведены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-12-00135).

Список литературы

1. Gu R., Antoszewski J., Lei W., Madni I., Umana-Membreno G., Faraone L. MBE growth of HgCdTe on GaSb substrates for application in next generation infrared detectors // *J. Cryst. Growth*. 2017. Vol. 468. P. 216–219.
2. Бурлаков И. Д., Дирочка А. И., Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филадельф А. М. Твердотельная фотоэлектроника. Современное состояние и прогноз развития. (обзор к 50-летию факультета физической и квантовой электроники Московского физико-технического института) // *Успехи прикладной физики*. 2014. Т. 2, № 5. С. 509–519.
3. Kinch M. A. The future of infrared; III-Vs or HgCdTe? // *J. Electron. Mater.* 2015. Vol. 44. No. 9. P. 2969–2976.
4. Kopytko M., Kęblowski A., Gawron W., Pusz W. LWIR HgCdTe barrier photodiode with Auger-suppression // *Semicond. Sci. Technol.* 2016. Vol. 31, N. 3. P. 035025 (6 p.).
5. Kopytko M., Rogalski A. HgCdTe barrier infrared detectors // *Progress in Quantum Electronics*. 2016. Vol. 47. P. 1–18.
6. Itsuno A. M. Bandgap-Engineered Mercury Cadmium Telluride Infrared Detector Structures for Reduced Cooling Requirements: Doctoral dissertation. University of Michigan, 2012.
7. Maimon S., Wicks G. W. nBn detector, an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 89. P. 151109 (3 p.).
8. Kopytko M., Kęblowski A., Gawron W., Madejczyk P. Different cap-barrier design for MOCVD grown HOT HgCdTe barrier detectors // *Opto-Electron. Rev.* 2015. Vol. 23, N. 2. P. 143–148.
9. Pedrazzani J. R., Maimon S., Wicks G. W. Use of nBn structures to suppress surface leakage currents in unpassivated InAs infrared photodetectors // *Electron. Lett.* 2008. Vol. 44, N. 25. P. 1487–1488.
10. Reine M., Pinkie B., Schuster J., Bellotti E. Numerical Simulation and Analytical Modeling of InAs nBn Infrared Detectors with n-Type Barrier Layers // *J. Electron. Mater.* 2014. Vol. 43, N. 8. P. 2915–2934.
11. Soibel A., Keo S. A., Fisher A., Hill C. J., Luong E., Ting D. Z., Gunapala S. D., Lubyshev D., Qiu Y., Fastenau J. M., Liu A. W. K. High operating temperature nBn detector with monolithically integrated microlens // *Appl. Phys. Lett.* 2018. Vol. 112, N. 4. P. 041105.
12. Martyniuk P., Kopytko M., Rogalski A. Barrier infrared detectors // *Opto-Electron. Rev.* 2014. Vol. 22, No. 2. P. 127–146.
13. Bubulac L. O. Defects, diffusion and activation in ion implanted HgCdTe // *J. Crystal Growth*. 1988. Vol. 86, N. 1–4. P. 723–734.
14. Talipov N., Voitsekhovskii A. Annealing kinetics of radiation defects in boron-implanted $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ // *Semicond. Sci. Technol.* 2018. Vol. 33, No. 6. P. 065009 (8 p.).
15. Martyniuk P., Rogalski A. Theoretical modelling of MWIR thermoelectrically cooled nBn HgCdTe detector // *Bulletin of the polish academy of sciences. Technical sciences*. 2013. Vol. 61, N. 1. P. 211–220.
16. Ye Z. H., Chen Y. Y., Zhang P., Lin C., Hu X. N., Ding R. J., He L. Modeling of LWIR nBn HgCdTe Photodiode // *Proc. of SPIE*. 2014. Vol. 9070. P. 90701L-1.
17. Akhavan N. D., Jolley G., Umana-Membreno G. A., Antoszewski J., Faraone L. Theoretical study of midwave infrared HgCdTe nBn detectors operating at elevated temperatures // *J. Electron. Mater.* 2015. Vol. 44, N. 9. P. 3044–3055.
18. Kopytko M., Józwiowski K., Martyniuk P., Gawron W., Madejczyk P., Kowalewski A., Markowska O., Rogalski A., Rutkowski J. Status of HgCdTe barrier infrared detectors grown by MOCVD in Military University of Technology // *J. Electron. Mater.* 2016. Vol. 45, N. 9. P. 4563–4573.
19. Kopytko M., Wrobel J., Józwiowski K., Rogalski A., Antoszewski J., Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Faraone L., Becker C. R. Engineering the Bandgap of Unipolar HgCdTe-Based nBn Infrared Photodetectors // *J. Electron. Mater.* 2015. Vol. 44, N. 1. P. 158–166.
20. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Gu R., Asadnia M., Antoszewski J., Faraone L. Superlattice barrier HgCdTe nBn infrared photodetectors: validation of the effective mass approximation // *IEEE Trans. Electron Dev.* 2016. Vol. 63, N. 12. P. 4811–4818.
21. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Gu R., Antoszewski J., Faraone L. Optimization of superlattice barrier HgCdTe nBn infrared photodetectors based on an NEGF approach // *IEEE Trans. Electron Dev.* 2018. Vol. 65, N. 2. P. 589–591.
22. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Gu R., Antoszewski J., Faraone L. Delta Doping in HgCdTe-Based Unipolar Barrier Photodetectors // *IEEE Trans. Electron Dev.* 2018. Vol. 65, N. 10. P. 4340–4345.
23. Velicu S., Zhao J., Morley M., Itsuno A. M., and Phillips J. D. Theoretical and experimental investigation of MWIR HgCdTe nBn detectors // *Proc. SPIE*. 2012. Vol. 8268. P. 82682X (13 p.).
24. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. Mid-wave infrared HgCdTe nBn photodiode // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 100, N. 16. P. 161102 (3 p.).
25. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. Design of an Auger-Suppressed Unipolar HgCdTe NBmN Photodiode // *J. Electron. Mater.* 2012. Vol. 41, N. 10. P. 2886–2892.
26. Gravrand O., Boulard F., Ferron A., Ballet Ph., Hassis W. A new nBn IR detection concept using HgCdTe material // *J. Electron. Mater.* 2015. Vol. 44, N. 9. P. 3069–3075.
27. Tennant W. E., Tennant W. E., Lee D., Zandian M., Piquette E., Carmody M. MBE HgCdTe technology: a very general solution to IR detection, described by "Rule 07", a very convenient heuristic // *J. Electron. Mater.* 2008. Vol. 37, N. 9. P. 1406–1410.
28. Ashley T., Elliott C. T. Nonequilibrium devices for infra-red detection // *Electron. Lett.* 1985. Vol. 21, N. 10. P. 451–452.
29. Schaake H. F., Kinch M. A., Chandra D., Agariden F., Liao P. K., Weirauch D. F., Wan C. F., Scritchfield R. E., Sullivan W. W., Teherani J. T., Shih H. D. High-operating-temperature MWIR detector diodes // *J. Electron. Mater.* 2008. Vol. 37, N. 9. P. 1401–1405.
30. Kopytko M., Kęblowski A., Madejczyk P., Martyniuk P., Piotrowski J., Gawron W., Grodecki K., Józwiowski K., Rutkowski J. Optimization of a HOT LWIR HgCdTe photodiode for fast response and high detectivity in zero-bias operation mode // *J. Electron. Mater.* 2017. Vol. 46, N. 10. P. 6045–6055.
31. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. Design and Modeling of HgCdTe nBn Detectors // *J. Electron. Mater.* 2011. Vol. 40, N. 8. P. 1624–1629.
32. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. Predicted performance improvement of Auger-suppressed HgCdTe photodiodes and heterojunction detectors // *IEEE Trans. Electron Dev.* 2011. Vol. 58, N. 2. P. 501–507.

A. V. Voitsekhovskiy¹, D. Sc., Professor, Head of Department, vav43@mail.tsu.ru,
N. A. Kulchitskiy², D. Sc., Professor, n.kulchitskiy@gmail.com, S. N. Nesmelov¹, Ph. D., Senior Researcher,
S. M. Dzyadukh¹, Ph. D., Senior Researcher, D. I. Gorn¹, Ph. D., Senior Researcher,
¹ National Research Tomsk State University, Tomsk 634050, Russian Federation
² Orion R & P Association, JSC, Moscow, 111538, Russian Federation

Corresponding author:

Gorn Dmitry I., Ph. D., Senior Researcher, National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russian Federation, e-mail: gorn.di@gmail.com

Current State of Research in the Field of HgCdTe-based Unipolar Barrier Structures

Received on October 15, 2019

Accepted on October 21, 2019

It is known that it is required deep cooling to achieve high sensitivity and reduced noise levels in semiconductor infrared (IR) photodetectors. This is due to a quite high level of charge carriers thermal generation in the narrow band-gap semiconductor material.

In this regard, at present there are a lot of basic and applied research devoted to finding innovative ways to improve the performance and reduce the cost of IR photodetectors, including the development of new types of photodetectors. One of the main trends in the development of the technology of IR photodetectors is to increase the operating temperature of the device and seek a complete rejection of cryogenic cooling systems that significantly increase the cost of the device and narrow its scope.

The current state of research in the development of unipolar barrier structures based on MBE n-HgCdTe for infrared detectors with reduced dark currents is analyzed in this work. It is shown that barrier structures of the nBn type are an alternative for creating IR photodiode receivers for medium and far infrared radiation range. At the moment, there are still a number of unsolved design and technological problems in the development of such detectors. The presence of a barrier for holes in the valence band in nBn structures based on HgCdTe requires a number of technological solutions: the use of large external bias values, control of the barrier layer parameters, including acceptor doping of the barrier, and the use of multilayer structures with a complex barrier layer design, including barriers in the form of superlattices.

Keywords: unipolar structure, barrier structure, HgCdTe, molecular-beam epitaxy, nBn, IR photodiode, IR photodetector

For citation:

Voitsekhovskiy A. V., Kulchitskiy N. A., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Gorn D. I. Current State of Research in the Field of HgCdTe-based Unipolar Barrier Structures, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 12, pp. 726–737.

DOI: 10.17587/nmst.21.726-737

Introduction

Necessity for development of photodetectors of the third generation imposes increased requirements to the infrared (IR) detectors. Among the basic factors for improvement of the working characteristics of the photosensitive instrument structures of the infrared range it is possible to mention an increased working temperature, low costs, smaller weight and overall dimensions of the devices [1, 2]. Semiconductor solid solution of HgCdTe (telluride of cadmium and mercury, CMT) is an ideal material for development of IR detectors. This is due, first of all, to the dependence of the width of the band gap on the content of CdTe, secondly, to big optical coefficients of absorption, and hence, great values of the quantum efficiency, thirdly, to the recombination mechanisms ensuring longer lifetime of the charge carriers and higher working temperature, and, fourthly, to an extremely weak dependence of the constant lattice on the composition (which allows us to grow high-quality multilayered heterostructures).

Thanks to the above properties HgCdTe are widely applied for development of highly sensitive IR detectors for various spectral areas [3]. The focal plane matrixes for the medium (MWIR) and long (LWIR) spectral ranges usually have a hybrid architecture: a photosensor on the basis of $p-n$ photodiodes from HgCdTe is combined with a silicon reading circuit. The working temperatures of the detectors, at which a realization of the mode of restriction of the threshold characteristics by the noise of the background radiation is possible, are determined by the generation-recombination mechanisms in HgCdTe, defining the dark currents (noises). For suppression of the dark currents it is necessary to cool the sensitive elements of the photodetectors down to rather low temperatures (for example, 77 K in case of LWIR detection). A key condition for creation of a high-temperature detector is minimization of the thermal generation in the active area without a decrease of the quantum efficiency. Among all the mechanisms of the thermal generation-recombination (GR) in the

narrow band semiconductors, the crucial role is played by the band-to-band Auger processes (Auger 1 and Auger 7, having the smallest threshold energy) and also GR by Shockley—Read—Hall (SRH) mechanism through the trap levels. The radiating recombination usually does not limit the characteristics of the correctly designed detectors [4].

Barrier structures

The further progress of the infrared detectors on the basis of HgCdTe is connected with development of such technologies for receiving of materials as the molecular beam epitaxy (MBE) and a gas-phase epitaxy from metalorganic compounds (GPEMOC, MOCVD). These technologies allow us to grow films with precision-controlled distribution of the component structure and concentration of the alloying impurity by thickness. This gives us opportunities for development of a new architecture of the instrument structures ensuring, for example, an increase of the working temperature of the detectors and simplification of the technological cycle for their production [5]. By the present moment there are many various architectures of the barrier detectors on the basis of HgCdTe, among which the most promising ones for use in MBE method are the unipolar configurations (nBn - and $NBvN$ -structures) allowing us to simplify the technology for obtaining of the detectors and to lower the dark currents [6].

In 2006 the concept of the barrier photosensitive structure was offered [7], which often is structurally compared with the classical $p-n$ photodiode. The distinctions are that the spatial charge area (SCA) of $p-n$ -junction is replaced with a barrier (wide-band) layer of B, while the p -area — with the contact layer of n -type. In the second n -layer an absorption of radiation takes place. Due to introduction of a wide-band barrier when a negative voltage is supplied to the structure (the negative potential is applied to the contact layer) a potential barrier for the electrons appears (a suppression of the dark currents of the main charge carriers), but, at the same time, there is no barrier for the minority charge carriers (holes) resulting from the photogeneration [8]. Introduction of a barrier layer instead of SCA of the $p-n$ photodiode reduces the contribution to the dark current of the components connected with the SRH processes and also with the surface leak.

The concept of nBn -structures was offered (and for the first time realized in practice) for the detectors on the basis of InAs compounds (A^3B^5 group) with energy gap of the heteroborders of the second type. The proposed structure consisted only of the n -type conductivity layers with an unalloyed barrier from InAsSb (or AlAsSb) [9]. A feature of such detectors was an almost zero rupture of the valence band on the heteroborder of the barrier and the contact layer with a big

height of the barrier (>1 eV) in the conductivity band. R & D works related to nBn -detectors on the basis of InAs compounds are being continued actively [10, 11]. It was theoretically proved that the nBn -detectors on the basis of the compounds of the A^3B^5 group in case of a full realization of their potential advantages could compete with the traditional detectors from HgCdTe [12].

Now a popular method is creation on the basis of MBE HgCdTe of the photodiodes of n -type on p by implantation of the ions of boron into an epitaxial film (without annealing) and also of the photodiodes of p -type on n by means of implantation of the ions of arsenic and subsequent activation annealing. For HgCdTe the use of nBn -architecture is also promising. It can ensure a considerable advantage compared with the traditional photodiodes (and also two-layer planar heterojunctions — DLPH) due to improvement of the quality of the material in absence of the post-implantation defects [13, 14]. Elimination of the need for carrying out of an ionic implantation (sometimes with a subsequent annealing) will simplify the technology for creation of the detectors. But during realization of the nBn -architecture in HgCdTe a problem appears connected with the fact that the first type of arrangement of the energy bands is characteristic for the heteroborders of the barrier layer in HgCdTe, which means a nonzero rupture of the valence band. Such a rupture of the bands hinders the current of the photocarriers.

As a solution to this problem it was proposed to increase the bias voltage on the structure. In the work [15] a numerical modeling was done of the energy diagrams of the photosensitive $nBnn$ -structure with the absorbing layer of $Cd_{0.275}Hg_{0.725}Te$ intended for an average IR area and with a complex three-layer barrier including the central layer with $Cd_{0.6}Hg_{0.4}Te$ and two layers surrounding it with a variable composition. Fig. 1 presents the calculated dependences of the detectivity on the size of the external voltage at the temperature of 200 K.

From the curves presented in fig. 1 it is visible that the barrier layers with a bigger composition ensure better values of the detectivity of a device, which is explained by a more effective shielding of the current of the main charge carriers of the structure by a wider-band barrier. At that, availability of a barrier for the holes in the valence band determines low values of the detectivity at a zero external voltage. At an increase of the negative external voltage the geometry of the potential barriers undergoes essential changes both for the electrons, and for the holes. At an increase of the voltage the height of the barrier for the holes becomes less, which reduces the barrier for the current of the minority carriers and leads to an increase of the detectivity. However, at too great values of the voltage (~ 0.4 V) a change of the geometry of the barrier in the conductivity band becomes essential: its form aspires to a tri-

angular, the tunnel transparency of the barrier increases, while the efficiency of shielding of the current of the main carriers decreases, which results in the subsequent decrease of the values of the detectivity (fig. 2). Similar results were also received by the other authors [16, 17].

Structures with the *p*-type barriers

Another approach to minimization of a rupture of the valence band is creation of a barrier of *p*-type conductivity. The work [8] demonstrates a possibility of almost complete elimination of the barrier to the holes (at a certain bias) by a precision acceptor alloying of the barrier area. Such an approach is unpromising when MBE is used and is possible only for growth of the heterostructures by MOCVD method [18], which allows us to receive *in situ* a material of both the donor, and the acceptor types of conductivity. Besides, formation of a barrier layer of *p*-type will lead to emergence of SCA near the heteroborders of the barrier layer, which will cause an intensive generation on the SRH mechanism. Therefore, the advantage of the use of the barrier alloyed by an acceptor impurity is not obvious.

Structures with the superlattice barriers

The direction connected with the use of the multi-layered barriers, including barriers in the form of superlattices, suits MBE method better [19]. Fig. 3, *a* presents the calculated zonal diagram of a similar structure, in which the role of the barrier is played by the uniform layers of *n*- and *p*-types of conductivity. A calculation of the power zonal diagram of the structure, in which the role of the barrier was played by Cd_{0.95}Hg_{0.05}Te/HgTe superlattice consisting of 28 periods, demonstrated that in such a system the potential barrier was eliminated completely in the valence band without formation of SCA (fig. 3, *b*)

This approach got its further development in the work [20]. The calculations done with account of the quantum-mechanical nature of the superlattice in the barrier layer demonstrated that at the thickness of the barriers of CdTe and wells of HgTe equal to 1.3 and 3.7 μm respectively, the maximal relation of the hole current to the electron one was reached, if the number of the layers in the superlattice exceeded 12 [21]. The works of this group also theoretically proved that a decrease of the barrier in the valence band was possible at a non-uniform distribution of the composition and the alloying impurity in the barrier layer [22]. Experimentally these methods of the barrier decrease in the valence band were not elaborated in detail.

Another problem of the *nBn*-detectors on the basis of HgCdTe is an insufficient height of the potential barrier for electrons (less than 1 eV), which increases the probability of tunneling of the electrons through the barrier or over it. A solution to this problem requires

a careful selection of the thickness of the barrier and concentration of the alloying impurity in the contact layer [23]. Important tasks related to production of the *nBn*-structures are elimination of the surface leak currents and selection of the correct configuration of the contacts [8].

Experimental samples of the *nBn*-detectors from HgCdTe

Despite a considerable number of publications (about 100) devoted to the theoretical substantiation of the potential advantages of the *nBn*-structures, only few single attempts of a practical realization of the *nBn*-detectors from HgCdTe are known. The first *nBn*-detectors on the basis of HgCdTe with the boundary wavelength of 5.7 μm at 77 K were grown by the MBE method (Riber 32 MBE system) on a substrate from the volume CdZnTe [23, 24]. The authors discovered that the volt-ampere characteristic (VAC) was defined by the form of the barrier and depended on the applied voltage. Within the range of temperatures of 180...250 K a diffusive restriction of the dark current was observed (the density of the current was 1–3 A/cm²), at the lower temperatures the current was limited by the generation through the surface traps. The photoresponse depended on the applied voltage. According to estimates, the maximal internal quantum efficiency was 66 %. The authors do not present absolute values of the spectral sensitivity, which complicates assessment of the quality of a device. At the second development of HgCdTe *nBn*-structure by means of the MBE method the received values of the density of the dark current (3.74 · 10⁻⁶ A/cm²) were considerably smaller (approximately by 5 orders) at the temperature of 77 K and a voltage of 0.5 V [25]. Such a spread of the results testifies to the necessity of the systematic research works for optimization of the parameters of the structures and the technological processes.

A scientific group from France also made an attempt to create MWIR *nBn*-structure on the basis of MBE HgCdTe with an asymmetric barrier layer and a uniform alloying [26]. In spite of the fact that, according to estimates, the quantum efficiency reached 60 %, great values of the density of current at 77 K were observed (about 10⁻³ A/cm²). VAC had an appearance which differed considerably from the ones, predicted as a result of modeling, and the research done by means of mass spectroscopy of the secondary ions demonstrated that a real distribution of composition by the film thickness differed considerably from what was expected.

Istuno A. Group (USA) made an attempt to create a planar LWIR *nBn*-structure, for which high values of the dark current density were observed (about 50 A/cm² at 77 K). Lighting led to an insignificant increase of the current at the reverse bias. The authors explained the

results by the presence of the surface leak currents. The values of the current density of the manufactured MWIR and LWIR *nBn*-structures by several orders exceed the forecast values of the expression for the dark current of IR Rule07 detectors [27], which can testify to big leak currents on the perimeter of the structure owing to the insufficient quality of the passivation.

Structures with a nonequilibrium depletion

One of the ways to suppress the Auger processes, which do not require cooling of a semiconductor, is creation of a nonequilibrium depletion [28]. The dark currents, which determine the working temperature of highly sensitive IR detectors on the basis of HgCdTe, are limited by the Auger generation processes. An uncommon task is reduction of the requirements to cooling of the detectors without deterioration of their working characteristics. The concept of high-temperature (HOT) structures is based on suppression of the Auger GR processes by a decrease of the thermal concentration of the charge carriers in the absorbing layer down to the values, less than the equilibrium ones. In HOT detectors a weakly doped narrow-band absorbing layer is used, on the one side of which a heterojunction is formed, ensuring exclusion of the charge carriers, and on the other side — a heterojunction, ensuring extraction of the charge carriers. Supply of a reverse bias causes a reduction of the concentration of the charge carriers in the absorbing layer, which is expressed in suppression of the Auger processes. The carried-out calculations of the threshold characteristics demonstrated that for HOT MWIR detectors the mode of restriction by the noise of the background radiation is implemented at the temperature of 203 K (in comparison with the temperature of 155 K for an ideal DLPH detector), while for the LWIR detector — at 145 K (102 K for the DLPH detector). According to calculations, the dark current in such HOT structures is less than in the photodiodes with *p-n* junctions [29], while the working characteristics at the set temperature are better. Now, LWIR HOT barrier structures are being developed on the basis of MOCVD HgCdTe containing *p*-layers, for a high-speed detection at the temperature of 230 K (the detectivity equal to $2 \cdot 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{0.5}/\text{W}$ was reached) [4, 30]. Developments of HOT barrier structures on the basis of MBE HgCdTe have not been described in literature yet.

Structures with the architecture of *NBvN* type

Another promising architecture of the unipolar barrier detectors on the basis of MBE *n*-HgCdTe is *NBvN*-конфигурация allowing us to increase the working temperature of the detectors due to suppression of the Auger — GR processes. Theoretically, HgCdTe detectors with *NBvN* architecture preserve the

technological advantages of the *nBn*-configuration, but, at the same time, they can demonstrate smaller dark currents, than the *p-n* photodiodes and the *nBn* detectors. An *NBvN* device contains four layers of the *n*-type: a high-alloyed covering layer, a weakly doped barrier layer, a weakly doped absorbing layer and a high-alloyed lower layer. A rupture of the conductivity band on the border of the absorbing layer and the barrier layer hinders the flow of the electrons from the covering layer to the absorbing layer. In the equilibrium conditions there is a barrier in the valence band on the border of the barrier layer and the absorbing layer, which blocks the transfer of the holes in the direction of the covering layer. During supply of a reverse bias the barrier in the valence band decreases. As a result, the holes appearing in the absorbing layer owing to the thermal and optical generation, gather in the top layer. The border between the absorbing layer and the barrier (or covering) layer ensures extraction of the holes, while the border between the absorbing layer and the lower layers ensures exclusion. As a result, the thermogenerated holes are removed effectively from the absorbing layer, and the concentration of the holes becomes considerably lower than the equilibrium values. For preservation of the electroneutrality in the absorbing layer the concentration of the electrons decreases below the equilibrium value, too. The GR processes on the Auger mechanism are suppressed due to the reduction of the total concentration of the carriers in the active layer. According to the results of modeling, the use of the *NBvN* configuration allows us to reduce the values of the dark current, to increase the detectivity and the working temperature (in comparison with *nBn* and DLPH) and also to exclude the technological problem of formation of the areas of *p*-type.

The authors of the work [25] carried out modeling of characteristics of the IR detectors on the basis of HgCdTe with *NBvN* architecture. The calculated density values of the dark current for detectors of MWIR and LWIR ranges were by an order (or even more) lower, than for *nBn* or DLPH detectors within the range of temperatures from 50 up to 225 K. The calculated values of the peak detectivity (D^*) for the MWIR detector were $6.01 \cdot 10^{14}$ and $2.36 \cdot 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{0.5}/\text{W}$ at the temperatures of 95 and 225 K, respectively. The values of D^* for the LWIR detector were $2.37 \cdot 10^{14}$ and $2.27 \cdot 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{0.5}/\text{W}$ at 50 and 95 K, respectively. The values of the detectivity were estimated from the maximal sensitivity calculated in the earlier works [31, 32].

Conclusion

On the basis of the carried-out review it is possible to conclude that the research works of the unipolar structures on the basis of MBE *n*-HgCdTe are promis-

ing and can lead to development of a breakthrough technology for the IR detectors. Despite a certain theoretical basis, a practical realization of the devices is hindered by a large number of unresolved fundamental, design and technological problems. Existence of a barrier for the holes in the valence band in the nBn structures on the basis of CMT material demands a number of technological solutions, among which are the following: use of great values of the external voltage, control of the parameters of the barrier layer, including an acceptor alloying of the barrier and also the use of the multilayered structures with a complex design of the barrier layer, including barriers in the form of the superlattices.

References

1. Gu R., Antoszewski J., Lei W., Madni I., Umana-Membreno G., Faraone L. MBE growth of HgCdTe on GaSb substrates for application in next generation infrared detectors, *J. Cryst. Growth.*, 2017, vol. 468, pp. 216–219.
2. Burlakov I. D., Dirochka A. I., Korneeva M. D., Ponomarenko V. P., Filachev A. M. Tverdotel'naya fotoelektronika. Sovremennoe sostoyanie i prognoz razvitiya. (obzor k 50-letiyu fakul'teta fizicheskoy i kvantovoy elektroniki Moskovskogo fiziko-tehnicheskogo instituta), *Uspekhi prikladnoj fiziki*, 2014, vol. 2, no. 5, pp. 509–519 (in Russian).
3. Kinch M. A. The future of infrared; III-Vs or HgCdTe?, *J. Electron. Mater.*, 2015, vol. 44, no. 9, pp. 2969–2976.
4. Kopytko M., Kęblowski A., Gawron W., Pusz W. LWIR HgCdTe barrier photodiode with Auger-suppression, *Semicond. Sci. Technol.*, 2016, vol. 31, no. 3, pp. 035025 (6 p.).
5. Kopytko M., Rogalski A. HgCdTe barrier infrared detectors, *Progress in Quantum Electronics*, 2016, vol. 47, pp. 1–18.
6. Itsuno A. M. Bandgap-Engineered Mercury Cadmium Telluride Infrared Detector Structures for Reduced Cooling Requirements: Doctoral dissertation. University of Michigan, 2012.
7. Maimon S., Wicks G. W. nBn detector, an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature, *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, pp. 151109 (3 p.).
8. Kopytko M., Kęblowski A., Gawron W., Madejczyk P. Different cap-barrier design for MOCVD grown HOT HgCdTe barrier detectors, *Opto-Electron. Rev.*, 2015, vol. 23, no. 2, pp. 143–148.
9. Pedrazzani J. R., Maimon S., Wicks G. W. Use of nBn structures to suppress surface leakage currents in unpassivated InAs infrared photodetectors, *Electron. Lett.*, 2008, vol. 44, no. 25, pp. 1487–1488.
10. Reine M., Pinkie B., Schuster J., Bellotti E. Numerical Simulation and Analytical Modeling of InAs nBn Infrared Detectors with n-Type Barrier Layers, *J. Electron. Mater.*, 2014, vol. 43, no. 8, pp. 2915–2934.
11. Soibel A., Keo S. A., Fisher A., Hill C. J., Luong E., Ting D. Z., Gunapala S. D., Lubyshev D., Qiu Y., Fastenau J. M., Liu A. W. K. High operating temperature nBn detector with monolithically integrated microlens, *Appl. Phys. Lett.*, 2018, vol. 112, no. 4, pp. 041105.
12. Martyniuk P., Kopytko M., Rogalski A. Barrier infrared detectors, *Opto-Electron. Rev.*, 2014, vol. 22, no. 2, pp. 127–146.
13. Bubulac L. O. Defects, diffusion and activation in ion implanted HgCdTe, *J. Crystal Growth*, 1988, vol. 86, no. 1–4, pp. 723–734.
14. Talipov N., Voitsekhovskii A. Annealing kinetics of radiation defects in boron-implanted p-Hg_{1-x}Cd_xTe, *Semicond. Sci. Technol.*, 2018, vol. 33, no. 6, p. 065009 (8 p.).
15. Martyniuk P., Rogalski A. Theoretical modelling of MWIR thermoelectrically cooled nBn HgCdTe detector, *Bulletin*

of the polish academy of sciences. *Technical sciences*, 2013, vol. 61, no. 1, pp. 211–220.

16. Ye Z. H., Chen Y. Y., Zhang P., Lin C., Hu X. N., Ding R. J., He L. Modeling of LWIR nBn HgCdTe Photodiode, *Proc. of SPIE*, 2014, vol. 9070, p. 90701L-1.
17. Akhavan N. D., Jolley G., Umana-Membreno G. A., Antoszewski J., Faraone L. Theoretical study of midwave infrared HgCdTe nBn detectors operating at elevated temperatures, *J. Electron. Mater.*, 2015, vol. 44, no. 9, pp. 3044–3055.
18. Kopytko M., Józwiowski K., Martyniuk P., Gawron W., Madejczyk P., Kowalewski A., Markowska O., Rogalski A., Rutkowski J. Status of HgCdTe barrier infrared detectors grown by MOCVD in Military University of Technology, *J. Electron. Mater.*, 2016, vol. 45, no. 9, pp. 4563–4573.
19. Kopytko M., Wrobel J., Jozwiowski K., Rogalski A., Antoszewski J., Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Faraone L., Becker C. R. Engineering the Bandgap of Unipolar HgCdTe-Based nBn Infrared Photodetectors, *J. Electron. Mater.*, 2015, vol. 44, no. 1, pp. 158–166.
20. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Gu R., Asadnia M., Antoszewski J., Faraone L. Superlattice barrier HgCdTe nBn infrared photodetectors: validation of the effective mass approximation, *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2016, vol. 63, no. 12, pp. 4811–4818.
21. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Gu R., Antoszewski J., Faraone L. Optimization of superlattice barrier HgCdTe nBn infrared photodetectors based on an NEGF approach, *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2018, vol. 65, no. 2, p. 589–591.
22. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Gu R., Antoszewski J., Faraone L. Delta Doping in HgCdTe-Based Unipolar Barrier Photodetectors, *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2018, vol. 65, no. 10, pp. 4340–4345.
23. Velicu S., Zhao J., Morley M., Itsuno A. M., Phillips J. D. Theoretical and experimental investigation of MWIR HgCdTe nBn detectors, *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8268, pp. 82682X (13 p.).
24. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. Mid-wave infrared HgCdTe nBn photodetector, *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, no. 16, pp. 161102 (3 p.).
25. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. Design of an Auger-Suppressed Unipolar HgCdTe NBmN Photodetector, *J. Electron. Mater.*, 2012, vol. 41, no. 10, pp. 2886–2892.
26. Gravrand O., Boulard F., Ferron A., Ballet Ph., Hassis W. A new nBn IR detection concept using HgCdTe material, *J. Electron. Mater.*, 2015, vol. 44, no. 9, pp. 3069–3075.
27. Tennant W. E., Tennant W. E., Lee D., Zandian M., Piquette E., Carmody M. MBE HgCdTe technology: a very general solution to IR detection, described by "Rule 07", a very convenient heuristic, *J. Electron. Mater.*, 2008, vol. 37, no. 9, pp. 1406–1410.
28. Ashley T., Elliott C. T. Nonequilibrium devices for infrared detection, *Electron. Lett.*, 1985, vol. 21, no. 10, pp. 451–452.
29. Schaake H. F., Kinch M. A., Chandra D., Aqariden F., Liao P. K., Weirauch D. F., Wan C. F., Scritchfield R. E., Sullivan W. W., Teherani J. T., Shih H. D. High-operating-temperature MWIR detector diodes, *J. Electron. Mater.*, 2008, vol. 37, no. 9, pp. 1401–1405.
30. Kopytko M., Kęblowski A., Madejczyk P., Martyniuk P., Piotrowski J., Gawron W., Grodecki K., Jozwiowski K., Rutkowski J. Optimization of a HOT LWIR HgCdTe photodiode for fast response and high detectivity in zero-bias operation mode, *J. Electron. Mater.*, 2017, vol. 46, no. 10, pp. 6045–6055.
31. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. Design and Modeling of HgCdTe nBn Detectors, *J. Electron. Mater.*, 2011, vol. 40, no. 8, pp. 1624–1629.
32. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. Predicted performance improvement of Auger-suppressed HgCdTe photodiodes and heterojunction detectors, *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2011, vol. 58, no. 2, pp. 501–507.

Н. В. Зенченко, мл. науч. сотр., e-mail: Zenchenko.Nikolay@yandex.ru,
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова
Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МОШНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Поступила в редакцию 25.05.2019

Рассчитана температура максимального нагрева активной области транзистора в зависимости от числа затворов, их длины и расстояния между ними. Разница в температуре активной области при распределении мощности между двумя и десятью затворами составила 92 °С, а при увеличении мощности пропорциональна числу для двух и десяти затворов — 46 °С. Увеличение расстояния между затворами позволяет добиться уменьшения температуры активной области до 35 %.

Ключевые слова: *HEMT-транзистор, моделирование тепловых процессов, транзисторы, GaN, гетероструктуры, монокристаллические интегральные схемы*

Введение

Транзисторы с высокой подвижностью электронов НЕМТ (*high electron mobility transistors*) на основе широкозонных гетероструктур AlGaIn/GaN достаточно привлекательны для применения в мощных приемо-передающих СВЧ устройствах и других силовых элементах электроники ввиду их очевидных преимуществ перед узкозонными полупроводниками. Основным преимуществом НЕМТ-транзисторов является высокая удельная мощность (более 10 Вт/мм), что позволяет существенно упростить топологию монокристаллических интегральных схем усилителей мощности, повысить эффективность и массогабаритные параметры. Это стимулирует и актуализирует многочисленные работы, целью которых является увеличение и без того широкой области применения НЕМТ-транзисторов. Одной из важных проблем при разработке НЕМТ является перегрев [1], который приводит к ухудшению частотных характеристик, росту тока утечки, а также к необратимым процессам, приводящим к выходу устройства из строя [2]. В настоящей работе исследуется зависимость максимального нагрева активной области НЕМТ-транзисторов [3, 4] от топологии [5, 6] с помощью моделирования методом конечных элементов. Результаты проведенного исследования позволят усовершенствовать конструкцию, увеличить эффективность и износостойкость

устройств на базе транзисторов с высокой подвижностью электронов. Ввиду растущей популярности НЕМТ-транзисторов и их высокой востребованности результаты исследования могут оказаться полезными для всех производителей транзисторов подобного типа.

Методика моделирования

СВЧ МИС представляет собой усилитель мощности, основным элементом которого является транзистор. В качестве примера на рис. 1 (см. четвертую сторону обложки) представлена упрощенная модель НЕМТ-транзистора с восемью затворами, предназначенная для проведения теплового расчета.

В данной тепловой модели источником теплоты является подзатворная часть канала Q . Контакт между слоями задан идеальным. Выделенная красным область была задана как объект, генерирующий теплоту.

Свойства материалов [7, 8], послужившие в качестве исходных данных для компьютерного моделирования, представлены в таблице.

В расчетах были приняты следующие условия:

- теплоотвод идеальный (принудительно задана температура для дна подложки 27 °С) [9];
- температура окружающей среды и начальная температура объекта 27 °С.

Результаты моделирования

На рис. 2 (см. четвертую сторону обложки) представлено полученное поверхностное распределение температуры для транзистора с рассеиваемой мощностью 1 Вт.

Поверхностное распределение температуры позволяет оценить степень локализации зоны максимального нагрева на поверхности МИС.

На рис. 3 (см. четвертую сторону обложки) представлено полученное объемное распределение температуры в виде изотермических поверхностей.

В целях исследования влияния топологии транзисторов на максимальную температуру активной области была создана параметрическая модель МИС, в которой последовательно проводили моделирование различных конфигураций транзисторов. В качестве изменяемых параметров были введены:

- переменное число затворов;
- переменное расстояние между затворами.

Моделирование проводили с использованием двух разных способов введения источника теплоты. В первом случае на все затворы независимо от их числа было подано абсолютное значение мощности, равное 0,3 Вт. Теплоотвод — идеальный, с температурой 27 °С [4]. Длина затворов — 100 мкм во всех случаях. Размер подложки — 3000 × 2000 × 300 мкм, материал подложки — сапфир. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

По графикам видно, что распределение выделяемой мощности между большим числом затворов позволяет сильно снижать температуру активной области. При расстоянии между затворами 10 мкм разница температур в случаях двух и 10 затворов составила 92 °С. Изменение расстояния между затворами позволяет снизить температуру активной области на 10...30 %.

Во втором случае на все затворы подавался удельный тепловой поток, равный 10^{10} Вт/м². Результаты моделирования представлены на рис. 5.

Свойства материалов СВЧ МИС
Properties of microwave MIC materials

| Материал Material | Функция в модели Function in the model | Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³ | Теплопроводность, Вт/(м·К) Heat conductivity, W/(m·K) | Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) Specific heat, J/(kg·K) |
|--------------------------------|---|--|--|---|
| GaN | Гетероструктура Heterostructure | 6070 | 130 | 490 |
| AlGaIn | | 5184 | 40 | 604 |
| Al ₂ O ₃ | Подложка Substrate | 3965 | 35 | 730 |
| SiC | | 3216 | 490 | 690 |

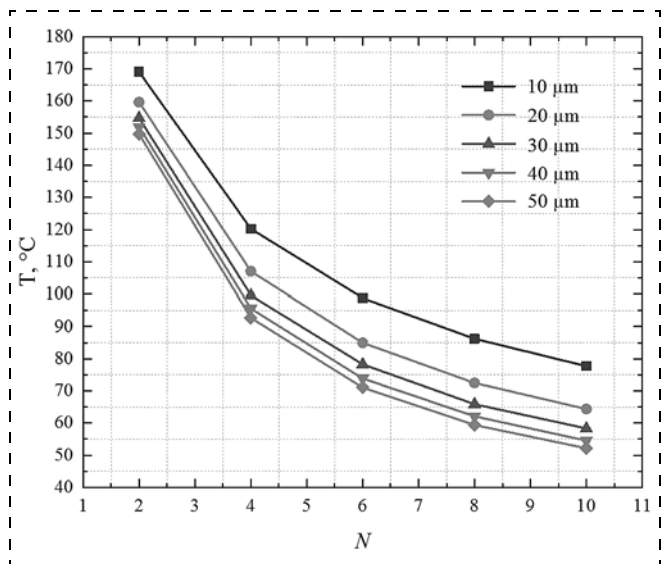


Рис. 4. Максимальная температура активной области транзистора в зависимости от числа затворов N и расстояния между ними. Абсолютное значение выделяемой мощности 0,3 Вт

Fig. 4. Maximal temperature of the active area of the transistor depending on the number of gates N and the distance between them. Absolute value of the allocated power is 0.3 W

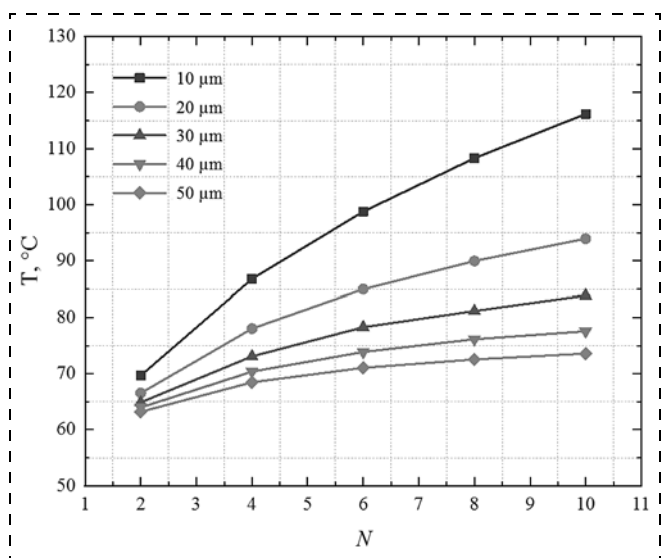


Рис. 5. Максимальная температура активной области транзистора в зависимости от числа затворов N и расстояния между ними. Удельная выделяемая мощность 10^{10} Вт/м²

Fig. 5. Maximal temperature of the active area of the transistor depending on the number of gates N and the distance between them. The specific allocated power is 10^{10} W/m²

На рис. 5 видно, что изменение числа затворов увеличивает максимальную температуру активной области, так как в данном случае при увеличении числа затворов увеличивалась и суммарная выделяемая мощность. Разница температур в случаях двух и 10 затворов и расстояния между ними 10 мкм составила 46 °С. Изменение расстояния между затворами позволяет снизить температуру активной области на 10...33 %.

Заключение

Транзисторы с рассеиваемой мощностью 0,3 Вт при малом числе затворов и расстоянием между ними могут нагреваться более чем до 150 °С, что будет негативно сказываться на работоспособности изделия. При рассеиваемой мощности, пропорционально увеличивающейся с числом затворов, разница температур в случае изменения расстояния между ними была наиболее ощутима. Разница температур активной области при изменении числа затворов и расстояния между ними может достигать 100 °С, что в условиях реальной эксплуатации изделий может иметь критическое значение. Полученные данные по нагреву активных областей НЕМТ-транзисторов различных топологий еще на этапе разработки топологии могут быть полезны для выбора оптимального расположения элементов на монолитной интегральной схеме, а также для выбора оптимальных режимов работы НЕМТ-транзистора.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (номер гранта 19-29-03003мк).

Список литературы

1. Pernot J., Zawadski W., Contreras S., Robert J. L., Neyret E., Di Cioccio L. Electrical transport in n-type 4H silicon

carbide // Journal of Applied Physics. 2001. Vol. 90, N. 4. P. 1869—1878.

2. Turin V. O., Balandin A. A. Electrothermal simulation of the self-heating effects in GaN-based field-effect transistors // Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 100. P. 054501.

3. Yang L., Ai S., Chen Y., Cao M., Zhang K., Ma X., Hao Y. A self-heating study on multi-finger AlGaIn/GaN high electron mobility transistors // Journal of Semiconductors. 2013. Vol. 34, N. 7. P. 074005.

4. Noh J., Ryoo Y., Jeon N., Cha H. Y., Seo K. S. Structural effects on heat dissipation in InGaAs MHEMTs // Semiconductor science and technology. 2013. Vol. 28, N. 4. P. 045012.

5. Ponomarev D. S., Vasil'evskii I. S., Galiev G. B., Klimov E. A., Khabibullin R. A., Kulbachinskii V. A., Uzeeva N. A. Electron mobility and effective mass in composite InGaAs quantum wells with InAs and GaAs nanoinserts // Semiconductors. 2012. Vol. 46, N. 4. P. 484—490.

6. Kulbachinskii V. A., Yuzeeva N. A., Galiev G. B., Klimov E. A., Vasil'evskii I. S., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S. Electron effective masses in an InGaAs quantum well with InAs and GaAs inserts // Semiconductor science and technology. 2012. Vol. 27, N. 3. P. 035021.

7. Зенченко Н. В., Рубан О. А., Алешин А. Н., Глинский И. А., Мельников А. А. Моделирование нестационарных тепловых режимов НЕМТ-транзистора // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 12 (173). С. 3—6.

8. Глинский И. А., Рубан О. А., Алешин А. Н., Зенченко Н. В., Мельников А. А. Расчет тепловых режимов НЕМТ-транзисторов на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 11 (172). С. 43—48.

9. Глинский И. А., Зенченко Н. В. Расчет теплораспределяющего элемента конструкции для мощных СВЧ-транзисторов // Микроэлектроника. 2015. Т. 44, № 4. С. 236—239.

N. V. Zenchenko, Junior Researcher, Zenchenko.Nikolay@yandex.ru,
Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Science (IUHFSE RAS),
Moscow, 117105, Russian Federation

Corresponding author:

Zenchenko Nicolay V., Junior Researcher, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Science (IUHFSE RAS), Moscow, Russian Federation, e-mail: Zenchenko.Nikolay@yandex.ru

Research of the Thermal Processes in High-power Field-effect Transistors based on Gallium Nitride

Received on May 23, 2019

Accepted on June 17, 2019

The main advantage of HEMT technology is a high power density (more than 10 W/mm), which allows us to significantly simplify the topology of the integrated circuits of the power amplifiers and increase the efficiency and mass-dimensional parameters. One of the important problems in designing of HEMT is overheating, which leads to a degradation of the frequency characteristics, an increase of the leakage current, as well as irreversible processes resulting in failure of the devices. This paper presents an investigation of the dependence between the topology and maximal heating of the transistors in the active area. The maximal heating was calculated depending on the number of the gates, their lengths and the distances between them. The heating level difference with the power distributed between 2 and 10 gates was 92 °C. The difference in heating with an increase of power was proportional to the number for 2 and 10 gates and was equal to 46 °C. By increasing the distance between the gates it is possible to achieve up to 35 % reduction in heating.

Keywords: HEMT, thermal modeling, GaN, heterostructures, finite element method

For citation:

Zenchenko N. V. Research of the Thermal Processes in High-power Field-effect Transistors based on Gallium Nitride, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 12, pp. 738–742.

DOI: 10.17587/nmst.21.738-742

Introduction

HEMT (high electron mobility transistors) on the basis of the wide-band heterostructures of AlGaIn/GaN are rather attractive for application in powerful transmitting-receiving microwave devices and other power elements of electronics due to their obvious advantages compared with the narrow-band semiconductors. The main advantage of HEMT is a high specific power (over 10 W/mm), which allows us to simplify significantly the topology of the monolithic integrated circuits of the power amplifiers, and increase the efficiency and mass-dimensional parameters. This encourages and makes topical numerous works, the aim of which is an increase of the already wide scope of application of HEMT transistors. One of the important problems involved in development of HEMT is overheating [1], which leads to a deterioration of the frequency characteristics, growth of the leakage current and also irreversible processes resulting in failures of the devices [2]. The given work analyses the dependence of the maximal heating of the active area of HEMT [3, 4] on the topology [5, 6] by means of modeling by the method of the finite elements. The results of the conducted research will allow us to improve the design, increase the efficiency and wear resistance of the devices on the basis of the high electron mobility transistors. In view of the growing popularity of HEMT and high demand for them, the results of the research may be useful for all producers of transistors of this kind.

Modeling technique

A microwave monolithic integrated circuit (MIC) is a power amplifier, the basic element of which is a transistor. Fig. 1 (see the 4-th side of cover) presents as an example of a simplified HEMT model with eight gates intended for carrying out of a thermal calculation.

In the given thermal model the source of warmth is the subgate part of channel Q . The contact between the layers is set as the ideal. The area marked by red was set as the object, generating warmth.

The properties of the materials [7, 8], which served as the basic data for the computer modeling, are presented in the table.

The calculations assume the following conditions:

The heat sink is ideal (the forcibly set temperature of the substrate bottom is 27 °C) [9];

The ambient temperature and the initial temperature of the object are 27 °C.

Results of modeling

Fig. 2 (see the 4-th side of cover) presents the received surface distribution of temperature for a transistor with the dissipation power of 1 W.

The surface distribution of temperature allows us to estimate the degree of localization of the zone of maximal heating on MIC surface.

Fig. 3 (see the 4-th side of cover) presents the received volume distribution of temperature in the form of isothermal surfaces.

For research of the influence of the transistors' topology on the maximal temperature of the active area, a MIS parametrical model was created, in which modeling of various configurations of transistors was carried out consistently. The following changeable parameters were introduced:

- Variable number of gates;
- Variable distance between the gates.

Modeling was carried out with the use of two different ways for introduction of a source of warmth. In the first case to all the gates, irrespective of their number, the absolute value of power, equal to 0.3 W, was supplied. The heat sink was ideal, with the temperature of 27 °C [4]. The length of all the gates was 100 μm in all cases. The size of the substrate was 3000 × 2000 × 300 μm, substrate material was sapphire. The results of modeling are presented in fig. 4.

From the diagrams it is visible that distribution of the allocated power between a big number of gates allows us to reduce radically the temperature of the active area. At the distance of 10 μm between the gates the difference in temperatures in cases of two and ten gates was 92 °C. Variation of the distance between the gates allows us to reduce the temperature of the active area by 10...30 %.

In the second case, the specific thermal flow equal to 10¹⁰ W/m² was supplied to all the gates. The results of modeling are presented in fig. 5.

In the figure it is visible that a change of the number of the gates increases the maximal temperature, because in this case the number of the gates increased and so did the total allocated power. The difference in temperatures in cases of two and ten gates and distances of 10 μm between them was 46 °C. A change of the distance between the gates allows us to reduce the temperature of the active area by 10...33 %.

Conclusion

The transistors with the dissipated power of 0.3 W in case of a small number of the gates and distance between them can heat up over 150 °C, which will have a negative effect on the operability of a product. In case of the dissipated power, increasing in proportion to the number of the gates, the difference in temperatures, when the distance between them changed, was most considerable. The difference in temperatures of the active area at a change of the number of the gates and the distances between them can reach 100 °C, which in the conditions of a real operation of products can be of crucial importance. The data concerning heating of the active areas of the HEMT of various topologies, obtained at the stage of development of the topology, can be useful for selection of the optimal arrangement of the elements on a monolithic integrated circuit and also for selection of the optimal operating modes of a HEMT.

References

1. Pernot J., Zawadski W., Contreras S., Robert J. L., Neyret E., Di Cioccio L. Electrical transport in n-type 4H silicon carbide, *Journal of Applied Physics*, 2001, vol. 90, no. 4, pp. 1869—1878.
2. Turin V. O., Balandin A. A. Electrothermal simulation of the self-heating effects in GaN-based field-effect transistors, *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 100, pp. 054501.
3. Yang L., Ai S., Chen Y., Cao M., Zhang K., Ma X., Hao Y. A self-heating study on multi-finger AlGaIn/GaN high electron mobility transistors, *Journal of Semiconductors*, 2013, vol. 34, no. 7, pp. 074005.
4. Noh J., Ryoo Y., Jeon N., Cha H. Y., Seo K. S. Structural effects on heat dissipation in InGaAs MHEMTs, *Semiconductor science and technology*, 2013, vol. 28, no. 4, pp. 045012.
5. Ponomarev D. S., Vasil'evskii I. S., Galiev G. B., Klimov E. A., Khabibullin R. A., Kulbachinskii V. A., Uzeeva N. A. Electron mobility and effective mass in composite InGaAs quantum wells with InAs and GaAs nanoinserts, *Semiconductors*, 2012, vol. 46, no. 4, pp. 484—490.
6. Kulbachinskii V. A., Yuzeeva N. A., Galiev G. B., Klimov E. A., Vasil'evskii I. S., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S. Electron effective masses in an InGaAs quantum well with InAs and GaAs inserts, *Semiconductor science and technology*, 2012, vol. 27, no. 3, pp. 035021.
7. Zenchenko N. V., Ruban O. A., Alyoshin A. N., Glinskij I. A., Mel'nikov A. A. Modelirovanie nestacionarnykh teplovykh rezhimov HEMT-tranzistora, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2014, no. 12, pp. 3—6 (in Russian).
8. Glinskij I. A., Ruban O. A., Alyoshin A. N., Zenchenko N. V., Mel'nikov A. A. Raschet teplovykh rezhimov HEMT-tranzistorov na osnove geterostruktury AlGaIn/GaN, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2014, no. 11, pp. 43—48 (in Russian).
9. Glinskij I. A., Zenchenko N. V. Raschet teploraspredeleyayushchego elementa konstrukcii dlya moshchnykh SVCH-tranzistorov, *Mikroelektronika*, 2015, vol. 44, no. 4, pp. 236—239 (in Russian).

УДК 621.375.832

DOI: 10.17587/nmst.21.742-748

Р. А. Хабибуллин, канд. физ.-мат. наук, доц., вед. науч. сотр.,
ИСВЧПЭ РАН, khabibullin_r@mail.ru

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ В РОССИИ

Поступила в редакцию 17.09.2019

В обзоре представлены наиболее значимые результаты, полученные в ходе разработки, изготовления и исследования терагерцовых квантово-каскадных лазеров (ТГц ККЛ) в России.

Ключевые слова: квантово-каскадные лазеры, терагерцовый диапазон, гетероструктура, квантовая яма, выходная мощность, двойной металлический волновод

Долгое время терагерцовый (ТГц) диапазон частот в литературе и науке рассматривался как "терагерцовый провал" (*terahertz gap*) — что определялось технологическими и техническими сложнос-

тями при создании источников и детекторов ТГц излучения в данном частотном диапазоне, а также наличием значительного поглощения ТГц излучения парами воды в атмосфере. В последнее деся-

тилетие наблюдается стремительное освоение ТГц диапазона, что привело к значительному сужению "терагерцового провала" до диапазона 6...10 ТГц, что соответствует так называемой *Reststrahlen band* для полупроводников АЗВ5. В первую очередь это связано с развитием подходов и технологий создания квантово-каскадных лазеров (ККЛ), которые работают в дальнем инфракрасном и терагерцовом диапазонах [1].

Со стороны высоких частот (10...30 ТГц) ККЛ на основе InAs/AlSb [2] и InGaAs/GaAsSb [3] гетероструктур продемонстрировали возможность генерации на длинах волн 25 и 28 мкм, что соответствует частотам 12,0 и 10,7 ТГц. Со стороны низких частот (1...6 ТГц) максимальная частота генерации ККЛ на основе GaAs/AlGaAs гетероструктуры составила 5,4 ТГц [4]. Однако создание ККЛ на описанных выше материалах в диапазоне 6...10 ТГц невозможно ввиду сильного поглощения излучения на оптических фононах.

Несмотря на значительный прогресс ТГц ККЛ с точки зрения таких характеристик, как рабочая температура и выходная мощность, остается еще много вопросов касательно электронного транспорта в чрезвычайно сложных квантовых системах, которые являются активной областью данных лазеров. Например, разработка более эффективных рабочих схем ТГц ККЛ с подавлением паразитных каналов проводимости привела к росту максимальной рабочей температуры с 50 К в 2002 г. [5] до 199,5 К в 2012 г. [6]. Долгое время ТГц ККЛ считались криогенными приборами, в которых чип лазера необходимо монтировать на холодную плату заливного криостата или криорефрижератора замкнутого цикла, что значительно ограничивало "малогабаритность" и "энергоэффективность" данных ТГц источников. Однако продолжение работ по исследованию электронного транспорта и созданию более продуманных дизайнов каскада позволили через 7 лет после "предыдущего рекорда" продемонстрировать в 2019 г. ТГц ККЛ с максимальной рабочей температурой 210 К и термоэлектрическим охлаждением [7], что, безусловно, является революционным результатом с точки зрения возможности применения данных лазеров.

На сегодняшний день ТГц ККЛ демонстрируют феноменальные для данного частотного диапазона выходные мощности. Разностороннее детальное исследование электронного транспорта в ТГц ККЛ и оптимизация дизайнов активной области разрабатываемых лазеров позволили в 2017 г. продемонстрировать выходную мощность около 2,4 Вт при температуре 10 К в импульсном режиме (около 1,8 Вт при температуре кипения жидкого азота) [8]. При этом нет никаких сомнений в том, что даль-

нейшие работы по созданию более продуманных рабочих схем ТГц ККЛ позволят увеличить выходную мощность данных источников.

Однако приведенные рекордные значения были получены на ККЛ с частотами излучения в диапазоне 3...4 ТГц. При продвижении частот от 3 к 1 ТГц выходные мощности и рабочие температуры существенно снижаются, что связано с различными физическими ограничениями. В первую очередь это связано с тем, что значение энергетического зазора между рабочими уровнями (около 8 мэВ для частоты 2 ТГц) становится сопоставимо с энергетическим уширением подзон (единицы миллиэлектрон-вольт). При этом уменьшается эффективность инжекции электронов на верхний лазерный уровень, что требует поиска новых схем работы ТГц ККЛ, в том числе новых способов инжекции электронов. Со стороны высоких частот (от 3 до 5 ТГц) рабочий диапазон ТГц ККЛ ограничен полосой остаточных лучей в GaAs.

В ККЛ инфракрасного диапазона характерные энергии фотонов составляют порядка 100 мэВ, что позволяет создавать относительно тонкие барьерные слои инжектора с энергетическим расщеплением верхнего лазерного уровня и уровня инжектора порядка 10 мэВ. В ТГц ККЛ энергии фотонов составляют порядка 10 мэВ, поэтому для селективной инжекции необходимы меньшие по сравнению с ИК ККЛ энергии расщепления (порядка 1 мэВ) и, соответственно, большие толщины барьерного слоя инжектора. Это приводит к потере когерентности при туннелировании электронов (уменьшается вероятность туннелирования вследствие упругих межподзонных механизмов рассеяния "*dephasing scatterings*") и снижает эффективность электронного транспорта через инжектор. Таким образом, для улучшения характеристик ТГц ККЛ необходимо разрабатывать новые схемы работы лазера с учетом важности когерентности электронного транспорта в GaAs/AlGaAs многослойных гетероструктурах.

До недавнего времени в России не было ни одной научной группы, освоившей изготовление лазеров ТГц диапазона. С 2015 г. по инициативе лауреата Нобелевской премии Ж. И. Алферова в рамках коллаборации Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова РАН, Санкт-Петербургского Академического университета РАН и Института физики микроструктур РАН была начата работа по созданию первого отечественного ТГц ККЛ, в ходе которой был продемонстрирован первый ТГц ККЛ, полностью изготовленный в России, с частотой генерации около 3,2 ТГц [9]. Участникам коллаборации удалось освоить расчет конструкции

активной области ТГц ККЛ, постростовую технологию изготовления двойного металлического волновода и сборку ТГц ККЛ на теплоотводе.

В ходе работы были предложены конструкции активной области ТГц ККЛ на основе трех и четырех туннельно-связанных квантовых ям с резонансно-фононной схемой депопуляции нижнего лазерного уровня и силой осциллятора диагонального излучающего перехода $f_{21} > 0,4$ [10, 11]. Проведен расчет спектров усиления ТГц ККЛ в зависимости от напряженности приложенного электрического поля и температуры [12].

Для создания ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом была разработана технология постростовой обработки многослойных GaAs/AlGaAs гетероструктур [13]. Предложен и апробирован оригинальный способ изготовления воздушных мостов для создания ТГц ККЛ, работающих в непрерывном режиме [14]. Проведено исследование эффективности электрической накачки ТГц ККЛ в зависимости от числа и расположения на лазерном полоске контактных площадок [15]. На основе численного моделирования распределения электрического потенциала в активной области ТГц ККЛ определены необходимые толщины верхней металлизации ТГц ККЛ для минимизации падения напряжения вдоль лазерного полоска в случае неоднородного питания током.

На сегодняшний день изготовлены ТГц ККЛ с частотами генерации 2,3, 3,3, 3,8 и 5,0 ТГц и максимальной рабочей температурой более 100 К [12, 16–18]. Проведено исследование влияния температуры на пороговый ток и выходную мощность изготовленных ТГц ККЛ. Показано, что при увеличении температуры от 40 до 58 К наблюдается незначительное уменьшение мощности излучения (на ~30 %), что позволяет использовать для охлаждения изготовленных ТГц ККЛ откачку паров азота. Определено, что температурная активация испускания ЛО-фононов "горячими" электронами на верхнем лазерном уровне является доминирующим механизмом рассеяния в исследуемых ТГц ККЛ.

Совместно с Институтом радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН проведено исследование спектров излучения ТГц ККЛ методом Фурье-спектроскопии в зависимости от амплитуды и длительности возбуждающего импульса тока [17]. Обнаружены эффект "перекачки" интенсивности между соседними продольными модами и сдвиг частоты спектральных линий на 3,7 ГГц при увеличении тока на 120 мА.

Совместно с Московским педагогическим университетом проведено исследование импульсной генерации ККЛ с использованием сверхпроводникового электронно-разогревного болометра SHEB

на основе NbN пленки [18]. В частности, было продемонстрировано, что, благодаря быстрому отклику болометра (~100 пс), появляется возможность регистрировать очень короткие импульсы излучения ККЛ. Варьируя параметры задающего импульса смещения, можно исследовать динамику процессов, происходящих в гетероструктуре, в частности, изучать режим появления и затухания генерации в зависимости как от длительности задающего импульса, так и от мгновенного значения его амплитуды. При использовании плавно нарастающего задающего импульса смещения фактически появляется возможность исследовать зависимость мощности генерации от напряжения (тока) смещения в режиме "реального времени", анализируя пару импульсов — задающий импульс и импульс, генерируемый сверхпроводниковым болометром, с помощью осциллографа.

Совместно с Белорусским государственным университетом разработана модель расчета вольт-амперных (ВАХ) и мощностных характеристик квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона (ТГц ККЛ) на основе системы балансных уравнений для локализованных состояний и состояний континуума [19]. Для учета влияния дефазировки на процессы переноса носителей заряда предложен метод модификации собственного базиса уравнения Шредингера путем снижения дипольных моментов туннельно-связанных состояний. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных ВАХ и зависимости интегральной интенсивности излучения от тока для ТГц ККЛ с частотой генерации 2,3 ТГц и найдено хорошее соответствие рассчитанных и экспериментальных значений порогового тока, токового диапазона генерации и максимальной рабочей температуры T_{max} . Впервые рассчитан спектр модовых потерь в ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом на основе золота, меди и серебра [20–22]. Показано, что использование двойного металлического волновода на основе серебра позволяет уменьшить потери на $2...4 \text{ см}^{-1}$ по сравнению с волноводом на основе золота, что дает возможность повысить T_{max} на ~10 К. На данный момент проведено изготовление ТГц ККЛ с Ag—Ag волноводом и проводятся измерения характеристик изготовленных лазеров.

Список литературы

1. Vitiello M. S., Scaliari G., Williams B., Natale P. D. Quantum cascade lasers: 20 years of challenges // Opt. Express. 2015. Vol. 23, N. 4. P. 5167–5182.
2. Lohmari Z., Bahriz M., Meguekam A., Teissier R., Baranov A. N. InAs-based quantum cascade lasers emitting close to $25 \mu\text{m}$ // Electron. Lett. 2019. Vol. 55, N. 3. P. 144–146.

3. Ohtani K., Beck M., Süess M. J., Faist J. Far-Infrared Quantum Cascade Lasers Operating in the AlAs Phonon Reststrahlen Band // *ACS Photonics*. 2016. Vol. 3, N. 12. P. 2280–2284.

4. Wienold M., Röben B., Lü X., Rozas G., Schrottke L., Biermann K., Grahn H. T. Frequency dependence of the maximum operating temperature for quantum-cascade lasers up to 5.4 THz // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 107. P. 202101.

5. Köhler R., Tredicucci A., Beltram F., Beere H. E., Linfield E. H., Davies A. G., Ritchie D. A., Iotti R. C., Rossi F. Terahertz semiconductor-heterostructure laser // *Nature*. 2002. Vol. 417. P. 156–159.

6. Fatholouloumi S., Dupont E., Chan C. W. I., Wasilewski Z. R., Laframboise S. R., Van D., Matyas A., Jirauschek C., Hu Q., Liu H. C. Terahertz quantum cascade lasers operating up to ~200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling // *Opt. Express*. 2012. Vol. 20, N. 4. P. 3866–3876.

7. Bosco L., Franckić M., Scalari G., Beck M., Wacker A., Faist J. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K // *Appl. Phys. Lett.* 2019. Vol. 115. P. 010601.

8. Li L. H., Chen L., Freeman J. R., Salih M., Dean P., Davies A. G., Linfield E. H. Multi-Watt high-power THz frequency quantum cascade lasers // *Electron. Lett.* 2017. Vol. 53, N. 12. P. 799–800.

9. Алферов Ж. И., Зубов Ф. И., Цырлин Г. Э., Жуков А. Е., Щаврук Н. В., Павлов А. Ю., Пономарев Д. С., Ключков А. Н., Хабибуллин Р. А., Мальцев П. П. Создание первого отечественного квантово-каскадного лазера терагерцового диапазона частот // *Нано- и микросистемная техника*. 2017. Т. 19, № 5. С. 259–265.

10. Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Pavlov A. Y., Klychkov A. N., Ponomarev D. S., Glinskiy I. A., Maltsev P. P., Zhukov A. E., Cirlin G. E., Alferov Z. I. Terahertz Quantum-Cascade Laser Based on the Resonant-Phonon Depopulation Scheme // *International Journal of High Speed Electronics and Systems*. 2016. Vol. 25, N. 03–04. P. 1640022.

11. Хабибуллин Р. А., Щаврук Н. В., Ключков А. Н., Глинский И. А., Зенченко Н. В., Пономарев Д. С., Мальцев П. П., Зайцев А. А., Жуков А. Е., Цырлин Г. Э., Алферов Ж. И. Энергетический спектр и тепловые свойства терагерцового квантово-каскадного лазера на основе резонансно-фононного дизайна // *ФТП*. 2017. Т. 51. В. 4. С. 540–546.

12. Хабибуллин Р. А., Щаврук Н. В., Пономарев Д. С., Ушаков Д. В., Афоненко А. А., Васильевский И. С., Зайцев А. А., Данилов А. И., Волков О. Ю., Павловский В. В., Маремьянин К. В., Гавриленко В. И. Температурная зависимость порогового тока и выходной мощности квантово-каскадного лазера с частотой генерации 3,3 ТГц // *ФТП*. 2018. Т. 52, вып. 11. С. 1268–1273.

13. Хабибуллин Р. А., Щаврук Н. В., Павлов А. Ю., Пономарев Д. С., Томош К. Н., Галиев Р. Р., Мальцев П. П., Жуков А. Е., Цырлин Г. Э., Зубов Ф. И., Алферов Ж. И. Из-

готовление терагерцового квантово-каскадного лазера с двойным металлическим волноводом на основе многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs // *ФТП*. 2016. Т. 50, вып. 10. С. 1395–1400.

14. Хабибуллин Р. А., Щаврук Н. В., Пономарев Д. С., Галиев Р. Р. Способ изготовления воздушных мостов: Патент на изобретение № 2671287, приоритет изобретения 22 сентября 2017 г.

15. Долгов А. К., Глинский И. А., Маремьянин К. В., Пономарев Д. С., Хабибуллин Р. А. Моделирование эффективности электрической накачки при неоднородном питании током квантово-каскадного лазера терагерцового диапазона частот // *Оптический журнал* (в печати).

16. Иконников А. В., Маремьянин К. В., Морозов С. В., Гавриленко В. И., Павлов А. Ю., Щаврук Н. В., Хабибуллин Р. А., Резник Р. Р., Цырлин Г. Э., Зубов Ф. И., Жуков А. Е., Алферов Ж. И. Генерация терагерцового излучения в многослойных квантово-каскадных гетероструктур // *Письма в ЖТФ*. 2017. Т. 43, вып. 7. С. 86–94.

17. Волков О. Ю., Дюжиков И. Н., Логунов М. В., Никитов С. А., Павловский В. В., Щаврук Н. В., Павлов А. Ю., Хабибуллин Р. А. Исследование спектров терагерцового излучения в многослойных GaAs/AlGaAs гетероструктурах // *Радиотехника и электроника*. 2018. Т. 63, № 9. С. 981–985.

18. Lobanov Yu. V., Vakhtomin Yu. V., Pentin I. V., Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Smirnov K. V. Characterization of the THz quantum cascade laser using fast superconducting hot electron bolometer // *EPJ Web of Conferences*. 2018. Vol. 195. P. 04004.

19. Ушаков Д. В., Афоненко А. А., Дубинов А. А., Гавриленко В. И., Волков О. Ю., Щаврук Н. В., Пономарев Д. С., Хабибуллин Р. А. Моделирование квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона частот методом балансных уравнений на основе базиса волновых функций с уменьшенными дипольными моментами туннельно-связанных состояний // *Квант. электроника*. 2019. Т. 49, № 10. С. 913–918.

20. Ушаков Д. В., Афоненко А. А., Дубинов А. А., Гавриленко В. И., Васильевский И. С., Щаврук Н. В., Пономарев Д. С., Хабибуллин Р. А. Спектры модовых потерь в ТГц квантово-каскадных лазерах с двойным металлическим волноводом на основе Au и Ag // *Квант. электроника*. 2018. Т. 48, № 11. С. 1005–1008.

21. Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Ponomarev D. S., Ushakov D. V., Afonenko A. A., Volkov O. Yu., Pavlovskiy V. V., Dubinov A. A. Terahertz quantum cascade lasers with silver- and gold-based waveguides // *EPJ Web of Conferences*. 2018. Vol. 195. P. 04002.

22. Khabibullin R., Ushakov D., Afonenko A., Shchavruk N., Ponomarev D., Volkov O., Pavlovskiy V., Vasil'evskii I., Sazonov D., Dubinov A. Silver-based double metal waveguide for terahertz quantum cascade laser // *Proc. SPIE*. 2018. International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2018. P. 1102204.

R. A. Khabibullin, Ph. D., Leading Researcher, khabibullin_r@mail.ru,
Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Science (IUHFSE RAS),
Moscow, Russian Federation

Corresponding author:

Khabibullin Rustam A., Ph. D., Leading Researcher, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of
Russian Academy of Science (IUHFSE RAS), Moscow, Russian Federation, khabibullin_r@mail.ru

Current State and Prospects for Development of Quantum-Cascade Lasers of the Terahertz Frequency Range in Russia

Received on September 17, 2019

Accepted on October 01, 2019

This paper reviews the most significant results received during research and development, and manufacture of the terahertz quantum-cascade lasers (THz QCL) in Russia.

Keywords: quantum-cascade lasers, terahertz range, heterostructure, quantum well, output power, double metal waveguide

For citation:

Khabibullin R. A. Current State and Prospects for Development of Quantum-Cascade Lasers of the Terahertz Frequency Range in Russia, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 12, pp. 742–748.

DOI: 10.17587/nmst.21.742-748

For a long time, the terahertz (THz) range of frequencies was considered in literature and science as "a terahertz gap", which was due to the technological and technical problems in development of the sources and detectors of THz radiation in this frequency range, and also to a considerable absorption of THz radiation by the water vapors in the atmosphere. In the recent decade a rapid development of THz range has been observed, which resulted in a considerable narrowing of "the terahertz gap" to the 6...10 THz range, corresponding to the so-called *Reststrahlen band* for A3B5 semiconductors. First of all, this is connected with elaboration of the approaches and technologies for development of the quantum -cascade lasers (QCL), which operate in the distant infrared and terahertz ranges [1].

On the high-frequency side (10...30 THz), QCL based on InAs/AlSb [2] and InGaAs/GaAsSb [3] heterostructures demonstrated a possibility of generation on the wavelengths of 25 and 28 μm , which correspond to frequencies of 12.0 and 10.7 THz. On the low-frequency side (1...6 THz), the maximal frequency of generation of QCL on the basis of GaAs/AlGaAs heterostructure was 5.4 THz [4]. However, development of QCL on the materials described above within the range of 6...10 THz is impossible because of a strong absorption of radiation on the optical phonons.

Despite a significant progress of THz QCL from the point of view of such characteristics as the working temperature and the output power, still, there are many questions concerning the electron transport in the extremely complex quantum systems, which are the active areas of these lasers. For example, development of more effective laser scheme of THz QCL with suppression of the parasitic channels of conductivity led to a growth of the maximal operation temperature from

50 K in 2002 [5] up to 199.5 K in 2012 [6]. For a long time THz QCL were considered as cryogenic devices, in which the laser chip had to be mounted on a cold board of the poured cryostat or cryo-refrigerator of the closed cycle, which limited considerably "small sizes" and "energy efficiency" of the given THz sources. However, continuation of the works for research of the electron transport and creation of improved designs of the cascade made it possible in 7 years after "the previous record" to demonstrate in 2019 THz QCL with the maximal working temperature of 210 K and thermoelectric cooling [7] which, certainly, was a revolutionary result from the point of view of application of these lasers.

Today THz QCL demonstrate the output power, phenomenal for this frequency range. A versatile detailed research of the electron transport in THz QCL and optimization of the designs of the active areas of the developed lasers allowed us in 2017 to show the output power of about 2.4 W at the temperature of 10 K in the pulse mode (about 1.8 W at the temperature of liquid nitrogen) [8]. At the same time there is no doubt that the further R & D works will result in more efficient laser scheme of THz QCL and allow us to increase the output power of these sources.

However, the presented record values were received on QCL with the radiation frequencies within the range of 3...4 THz. With advance of the frequencies from 3 to 1 THz the output power and the operation temperatures decrease significantly, which is connected with various physical restrictions. First of all, this is connected with the fact that the value of the power gap between the operating levels (about 8 meV for the frequency of 2 THz) becomes comparable with the power broadening of the subbands (units of milli electron volts). At the

same time the efficiency of injection of the electrons to the top laser level decreases, which demands a search for new scheme of operation of THz QCL, including new methods for injection of the electrons. From the side of the high frequencies (from 3 up to 5 THz) the working range of THz QCL is limited by *Reststrahlen band* for A3B5 semiconductors.

In QCL of the infrared range the characteristic energies of the photons equal to about 100 meV, which allows us to create relatively thin barrier injector layers with the energy of splitting of the top laser level and of the level of injector of about 10 meV. In THz QCL the energy of the photons equals to about 10 meV, therefore, a selective injection requires less, in comparison with IR QCL, energy of splitting for (about 1 meV) and, respectively, thicker barrier layer of the injector. This leads to a loss of coherence during tunneling of electrons (a probability of tunneling due to the elastic subbands mechanisms of scattering, "dephasing scatterings", decreases) and reduces the efficiency of the electron transport through the injector. Thus, in order to improve the characteristics of THz QCL it is necessary to develop new schemes for the laser operation, taking into account the importance of coherence of the electron transport in GaAs/AlGaAs multilayered heterostructures.

Until recently in Russia there was not a scientific group which had mastered production of lasers of THz range. In 2015, on the initiative of Zh. I. Alferov, Nobel Prize Winner, within the framework of collaboration of the V. G. Mokerov Institute of super high-frequency semiconductor electronics of RAS, St. Petersburg Academic University of RAS and Institute of physics of microstructures of RAS the work was started for development of the first domestic THz QCL, during which the first THz QCL made completely in Russia was demonstrated with the frequency of generation of about 3.2 THz [9]. The collaboration participants managed to master calculation of the active area of THz QCL, post-growth techniques for fabrication of a double metal waveguide and mounting of THz QCL on a heat sink. During the work the designs of the THz QCL were proposed with the active area on the basis of the three and four tunnel-coupled quantum wells with a resonant-phonon scheme for depopulation of the lower laser level and the oscillator strength of the diagonal radiating transition of $f_{21} > 0.4$ [10, 11]. Calculations were carried out of the gain spectra of THz QCL, depending on the applied electric field and temperature [12].

For fabrication of THz QCL with a double metal waveguide [13] a technology of the post-growth processing of the multilayered GaAs/AlGaAs heterostructures was developed. An original method was proposed and approved for production of air bridges for development of THz QCL operating in a continuous mode [14]. A research was conducted of the efficiency of the electric pumping of THz QCL depending on the

number and arrangement of the contact platforms on a laser strip [15]. On the basis of the numerical modeling of distribution of the electric potential in the THz QCL active area the thicknesses of the top metallization of THz QCL were determined, necessary for minimization of the power failure along the laser strip in case of a non-uniform current supply.

By the present moment THz QCL with the generation frequencies of 2.3, 3.3, 3.8 and 5.0 THz and with the maximal working temperature over 100 K [12, 16–18] were fabricated. A research was conducted of the influence of temperature on the threshold current and the output power of the fabricated THz QCL. It was demonstrated that with an increase of temperature from 40 up to 58 K an insignificant reduction of the radiation power was observed (by ~30 %) which allowed us to use pumping of nitrogen vapors for cooling of the manufactured THz QCL. It was shown that the temperature of activation of emission of LO phonons by "hot" electrons on the top laser level was the dominating mechanism for scattering in the studied THz QCL.

Jointly with the Institute of Radio Engineering and Electronics named after V. A. Kotelnikov of RAS a research was conducted of the ranges of radiation of THz QCL by Fourier spectroscopy method, depending on the amplitude and duration of the exciting pulse of current [17]. Effect of "transfer" of intensity was discovered between the neighboring longitudinal modes and a shift of frequency of the spectral lines by 3.7 GHz at an increase of current by 120 mA.

Jointly with the Moscow Pedagogical University a research was done of the pulse generation of QCL with the use of SHEB, superconductor electron-heating bolometer, on the basis of NbN film [18]. In particular, it was demonstrated that, thanks to a quick response of the bolometer (~100 ps), there was an opportunity to record very short pulses of radiation of QCL. By varying the parameters of the driving shift pulse, it is possible to investigate the dynamics of the processes happening in the heterostructure, in particular, to study the mode of emergence and attenuation of the generation, depending on both the duration of the driving pulse, and on the instant value of its amplitude. When using the smoothly accruing driving shift pulse, actually, there is an opportunity to investigate the dependence of the power of generation on the intensity (current) of the shift in the "real time" mode, analyzing a pair of pulses — the driving pulse and the pulse generated by the superconductor bolometer by means of an oscillograph.

Jointly with the Belarussian State University a model was developed for calculation of the current-voltage (I–V) and power characteristics of the quantum-cascade lasers of the terahertz range (THz QCL) on the basis of the system of the balance equations for the localized states and the states of continuum [19]. For taking into account the influence of dephasing on the processes of transfer of the charge carriers, a method

was proposed for modification of the own basis of the Schrödinger equation by a decrease of the dipolar moments of the tunnel-coupled states. A comparison was done of the calculated and experimental data of $I-V$ and the dependency of the integral intensity of radiation on current for THz QCL with the frequency of generation of 2.3 THz, and good correspondence was found for the calculated and experimental values of the threshold current, current range of generation and the maximal working temperature of T_{\max} . For the first time the range of the mode losses in THz QCL with a double metal waveguide on the basis of gold, copper and silver was calculated [20–22]. It was demonstrated that the use of a double metal waveguide on the basis of silver made it possible to reduce losses by $2...4 \text{ cm}^{-1}$ in comparison with a waveguide on the basis of gold, which allowed us to raise T_{\max} by $\sim 10 \text{ K}$. By the present moment, THz QCL with Ag–Ag waveguide has been manufactured and measurements of characteristics of the manufactured lasers are being taken.

References

- Vitiello M. S., Scalari G., Williams B., Natale P. D. Quantum cascade lasers: 20 years of challenges, *Opt. Express*, 2015, vol. 23, no. 4, pp. 5167–5182.
- Loghmani Z., Bahriz M., Meguekam A., Teissier R., Baranov A. N. InAs-based quantum cascade lasers emitting close to $25 \mu\text{m}$, *Electron. Lett.*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 144–146.
- Ohtani K., Beck M., Süess M. J., Faist J. Far-Infrared Quantum Cascade Lasers Operating in the AlAs Phonon Reststrahlen Band, *ACS Photonics*, 2016, vol. 3, no. 12, pp. 2280–2284.
- Wienold M., Röben B., Lü X., Rozas G., Schrottko L., Biermann K., Grahn H. T. Frequency dependence of the maximum operating temperature for quantum-cascade lasers up to 5.4 THz, *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 107, pp. 202101.
- Köhler R., Tredicucci A., Beltram F., Beere H. E., Linfield E. H., Davies A. G., Ritchie D. A., Iotti R. C., Rossi F. Terahertz semiconductor-heterostructure laser, *Nature*, 2002, vol. 417, pp. 156–159.
- Fatholouloumi S., Dupont E., Chan C. W. I., Wasilewski Z. R., Laframboise S. R., Ban D., Matyas A., Jirauschek C., Hu Q., Liu H. C. Terahertz quantum cascade lasers operating up to $\sim 200 \text{ K}$ with optimized oscillator strength and improved injection tunneling, *Opt. Express*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 3866–3876.
- Bosco L., Franckić M., Scalari G., Beck M., Wacker A., Faist J. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K, *Appl. Phys. Lett.*, 2019, vol. 115, pp. 010601.
- Li L. H., Chen L., Freeman J. R., Salih M., Dean P., Davies A. G., Linfield E. H. Multi-Watt high-power THz frequency quantum cascade lasers, *Electron. Lett.*, 2017, vol. 53, no. 12, pp. 799–800.
- Alferov Z. I., Zubov F. I., Cyrilin G. E., Zhukov A. E., Shchavruk N. V., Pavlov A. Yu., Ponomarev D. S., Klochkov A. N., Khabibullin R. A., Mal'cev P. P. Sozdanie pervogo otechestvennogo kvantovo-kaskadnogo lazera teragercovogo diapazona chastot, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 5, pp. 259–265 (in Russian).
- Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Pavlov A. Yu., Klochkov A. N., Ponomarev D. S., Glin'skiy I. A., Maltsev P. P., Zhukov A. E., Cyrilin G. E., Alferov Z. I. Terahertz Quantum-Cascade Laser Based on the Resonant-Phonon Depopulation Scheme, *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2016, vol. 25, no. 03–04, pp. 1640022.
- Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Klochkov A. N., Glin'skiy I. A., Zenchenko N. V., Ponomarev D. S., Mal'cev P. P., Zajcev A. A., Zhukov A. E., Cyrilin G. E., Alferov Z. I. Energeticheskij spektr i teplovye svojstva teragercovogo kvantovo-kaskadnogo lazera na osnove rezonansno-fononnogo dizajna, *FTP*, 2017, vol. 51, no. 4, pp. 540–546 (in Russian).
- Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Ponomarev D. S., Ushakov D. V., Afonenko A. A., Vasil'evskij I. S., Zajcev A. A., Danilov A. I., Volkov O. Yu., Pavlovskij V. V., Maren'yanin K. V., Gavrilenko V. I. Temperaturnaya zavisimost' porogovogo toka i vyhodnoj moshchnosti kvantovo-kaskadnogo lazera s chastotoj generacii 3.3 TGc, *FTP*, 2018, vol. 52, no. 11, pp. 1268–1273 (in Russian).
- Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Pavlov A. Yu., Ponomarev D. S., Tomosh K. N., Galiev R. R., Mal'cev P. P., Zhukov A. E., Cyrilin G. E., Zubov F. I., Alferov Z. I. Izgotovlenie teragercovogo kvantovo-kaskadnogo lazera s dvojnym metallicheskim volnovodom na osnove mnogoslujnyh geterostruktur GaAs/AlGaAs, *FTP*, 2016, vol. 50, no. 10, pp. 1395–1400 (in Russian).
- Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Ponomarev D. S., Galiev R. R. Sposob izgotovleniya vozdušnyh mostov, Patent na izobretenie № 2671287, prioritet izobreteniya 22 September 2017 (in Russian).
- Dolgov A. K., Glin'skiy I. A., Maren'yanin K. V., Ponomarev D. S., Khabibullin R. A. Modelirovanie effektivnosti elektricheskoy nakachki pri neodnorodnom pitanii tokom kvantovo-kaskadnogo lazera teragercovogo diapazona chastot, *Opticheskij zhurnal*, otravljena v redakciju (in Russian).
- Ikonnikov A. V., Maren'yanin K. V., Morozov S. V., Gavrilenko V. I., Pavlov A. Yu., Shchavruk N. V., Khabibullin R. A., Reznik R. R., Cyrilin G. E., Zubov F. I., Zhukov A. E., Alferov Z. I. Generaciya teragercovogo izlucheniya v mnogoslujnyh kvantovo-kaskadnyh geterostruktur, *Pis'ma v ZHTF*, 2017, vol. 43, no. 7, pp. 86–94 (in Russian).
- Volkov O. Yu., Dyuzhikov I. N., Logunov M. V., Nikitov S. A., Pavlovskij V. V., Shchavruk N. V., Pavlov A. Yu., Khabibullin R. A., Issledovanie spektrov teragercovogo izlucheniya v mnogoslujnyh GaAs/AlGaAs geterostrukturah, *Radiotekhnika i elektronika*, 2018, vol. 63, no. 9, pp. 981–985 (in Russian).
- Lobanov Yu. V., Vakhtomin Yu. B., Pentin I. V., Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Smirnov K. V. Characterization of the THz quantum cascade laser using fast superconducting hot electron bolometer, *EPJ Web of Conferences*, 2018, vol. 195, pp. 04004.
- Ushakov D. V., Afonenko A. A., Dubinov A. A., Gavrilenko V. I., Volkov O. Yu., Shchavruk N. V., Ponomarev D. S., Khabibullin R. A. Modelirovanie kvantovo-kaskadnyh lazerov teragercevcovogo diapazona chastot metodom balansnyh uravnenij na osnove bazisa volnovykh funkcij s umen'shennymi dipol'nymi momentami tunnel'no-svyazannyh sostoyanij, *Kvant. elektronika*, 2019, vol. 49, no. 10, pp. 913–918 (in Russian).
- Ushakov D. V., Afonenko A. A., Dubinov A. A., Gavrilenko V. I., Vasil'evskij I. S., Shchavruk N. V., Ponomarev D. S., Khabibullin R. A. Spektry modovyh poter' v TGc kvantovo-kaskadnyh lazerah s dvojnym metallicheskim volnovodom na osnove Au i Ag, *Kvant. elektronika*, 2018, vol. 48, no. 11, pp. 1005–1008 (in Russian).
- Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Ponomarev D. S., Ushakov D. V., Afonenko A. A., Volkov O. Yu., Pavlovskij V. V., Dubinov A. A. Terahertz quantum cascade lasers with silver- and gold-based waveguides, *EPJ Web of Conferences*, 2018, vol. 195, pp. 04002.
- Khabibullin R., Ushakov D., Afonenko A., Shchavruk N., Ponomarev D., Volkov O., Pavlovskij V., Vasil'evskij I., Safonov D., Dubinov A. Silver-based double metal waveguide for terahertz quantum cascade laser, *Proc. SPIE, 2018 International Conference on Micro- and Nano-Electronics*, 2018, pp. 1102204.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ "НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА" В 2019 г.

20 лет журналу "Нано- и микросистемная техника" № 12

Лучинин В. В. Эволюция вакуумной электроники. Микро- и наноразмерные системы и технологии. № 2

Фоминих Е. В., Супрун Е. В., Карякин А. А. К 185-летию А. П. Бородина — великого композитора и химика № 7

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Ануфриев Ю. В., Зенова Е. В., Молоденский М. С., Коива Д. А. Применение плазмонных эффектов в углеродных нанотрубках для повышения эффективности кремниевых солнечных преобразователей энергии № 8

Белов В. С., Орлов А. П., Дудин А. А., Терентьев А. В. Исследование электрофизических параметров контакта УНТ/оксид металла/металл для совершенствования оптических ректенн № 4

Белов В. С., Литвинова К. И., Тагаченков А. М., Сиротина А. П., Кириленко Е. П., Молоденский М. С., Шибалов М. В., Першина Е. А., Зенова Е. В. Определение изменения работы выхода углеродных нанотрубок методом Оже-электронной спектроскопии после нанесения тонкого слоя оксида гафния. № 8

Булярский С. В. Кинетика и термодинамика пиролиза ацетилена при синтезе углеродных нанотрубок № 8

Жуков Н. Д., Шишкин М. И., Ягудин И. Т., Хазанов А. А., Гавриков М. В. Мультизеренные структуры полупроводниковых наночастиц. № 7

Ларионов Ю. В. Сравнение размеров, измеренных растровым и просвечивающим электронными микроскопами, в диапазоне менее 50 нм № 11

Лашкова Н. А., Максимов А. И., Мошников В. А. Способ оценки адгезионной прочности соединения пьезоэлектрических нанокристаллов с подложкой № 2

Сиротина А. П., Шаман Ю. П., Сыса А. В., Перверзева С. Ю., Першина Е. А., Неклюдова П. А., Клименко А. А., Белов В. С., Базарова М. И.

Исследование влияния морфологии каталитической системы Co—Mo—MgO на синтез углеродных нанотрубок № 8

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Булярский С. В., Коива Д. А., Першина Е. А. Формирование пленок полупроводникового оксида титана методом магнетронного напыления № 12

Васильев В. Ю. Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 6. Каталитическое осаждение в проточных реакторах. № 1

Васильев В. Ю. Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 7. Обобщение информации по методам осаждения и особенностям пленок № 3

Васильев В. Ю. Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 8. Влияние водорода в пленках на их свойства . . № 6

Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., Горн Д. И. Современное состояние исследований в области создания униполярных барьерных структур на основе теллурида кадмия и ртути № 12

Галкина С. А., Барулина М. А. Влияние неизотропности материала на деформацию чувствительного элемента микромеханического акселерометра. № 1

Дерябкин А. В., Духновский М. П., Куликов Е. Н., Федоров Ю. Ю., Щербаков С. В. Монолитная замедляющая система из поликристаллического алмаза для ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн № 9

Козлов Г. В., Долбин И. В. Эффективность графена в качестве армирующего элемента структуры полимерных нанокомпозитов № 4

Коива Д. А., Дюдьбин Г. Д., Белов В. С., Рудаков Г. А., Булярский С. В. Влияние мощности магнетрона и потока кислорода на морфологию тонких пленок диоксида титана. № 8

Кондратьев П. К., Клименко А. А., Кочи Г. В., Соколов С. А. Применение спектрофотометрии для определения концентрации углеродных нанотрубок в металлокомпозитах. № 8

Крупкин Е. И., Аверин И. А., Пронин И. А., Карманов А. А., Якушова Н. Д. Получение наноструктурированных пленок оксида цинка и исследование их фотокаталитических свойств № 1

Мерданов М. К. Технологии исследования параметров волноводных фотонных кристаллов СВЧ методами № 11

Мирошникова В. Д., Рязанов А. А., Мирошникова Т. Д., Шугалов А. В. Развитие ионно-плазменных технологий на основе корончатых подложкодержателей № 5

Павловец Г. Я., Мелешко В. Ю., Гладышев А. И., Жуков А. О. Высокопроизводительная технология производства ультрананодисперсных порошков № 4

Пауткин В. Е. Технологические методы снижения шероховатости боковых стенок кремниевых МЭМС-структур № 10

Пауткин В. Е. Фрактальное разрушение металлизации при сборке микромеханических чувствительных элементов № 9

Ревин М. В., Беляков В. А., Иванов В. А., Котков А. П., Фефелов А. Г., Демидов Е. В., Дроздов М. Н., Юнин П. А., Шашкин В. И. Оптимизация конструкции канала рНЕМТ-гетероструктур (Al—In—Ga)As, полученных методом металлоорганической газофазной эпитаксии № 10

Редькин С. В. Кубический карбид кремния на кремнии для СВЧ, силовой и оптоэлектроники № 12

Тархов М. А., Дюдьбин Г. Д., Терентьев А. В., Зенова Е. В. Исследование влияния мягкой плазмы на шероховатость барьерного слоя TiN № 8

Тиняев В. А. Топологические особенности разработки микросхем с применением технологии монтажа flip-chip и wire bond № 7

Тихонов Р. Д., Поломошнов С. А., Черемисинов А. А., Горелов Д. В. Пленочные концентраторы магнитного поля на основе пермаллоя № 8

Торгашин С. И., Папко А. А., Пауткин В. Е., Цыпин Б. В. Технологические аспекты формирования первичных измерительных преобразователей микромеханических акселерометров. № 6

Шыхалиев К. С. Обобщение температурной зависимости некоторых физических свойств полиэтилена высокой прочности методом приведенных параметров. № 11

Юров В. М., Лауринас В. Ч., Гученко С. А. Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких магнитных наноструктур № 6

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Антонов А. Ю., Вараюнь М. И., Егоров Н. В. Линеаризованная трехпараметрическая регрессионная модель для сигнала полевой электронной эмиссии № 2

Белов В. С., Кириленко Е. П., Сиротина А. П. Определение концентрации матричных элементов в пленках TiN_xO_y методом Оже-электронной спектроскопии № 8

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 поверхностном нагружении. № 6

Васильев А. А., Бедрина М. Е., Андреева Т. А. Искажение поверхности фуллерена при взаимодействии с водородом № 2

Иовдальский В. А., Соколов И. А. Особенности построения передающего модуля L-диапазона на основе LDMOS-технологии № 11

Иовдальский В. А., Соколов И. А. Особенности построения приемо-передающего модуля L-диапазона на основе нитрид-галиевой технологии № 9

Каленов В. Е., Корляков А. В., Алексеев Н. И., Бройко А. П., Лагош А. В., Лучинин В. В., Хмельницкий И. К. Электромеханическая модель ИПМК актюатора № 2

Куранов Д. Ю., Бедрина М. Е. Моделирование взаимодействия наноструктур с поверхностью № 2

Лысенко И. Е., Ткаченко А. В. Аналитический расчет напряжения притяжения интегрального электростатического МЭМС-переключателя с емкостным принципом коммутации в конфигурации с копланарной линией передачи . . . № 5

Лысенко И. Е., Ткаченко А. В. Аналитический расчет времени переключения интегрального электростатического МЭМС-переключателя с емкостным принципом коммутации в конфигурации с копланарной линией передачи . . . № 7

- Любимов А. В., Коровин Г. В., Иванов Е. А.** Концепция построения высокоэффективных преобразователей энергии на стыке подходов квазирезонансного управления и применения современных керамических материалов. № 6
- Масальский Н. В.** Расширенный подход к моделированию вольт-амперных характеристик КНИ МОП-транзистора № 3
- Новиков С. Г., Кадочкин А. С., Беринцев А. В., Светухин В. В., Алексеев А. С.** Моделирование радиолюминесцентных композиций на основе микрочастиц ^{63}Ni для радиоизотопных источников электрического питания. № 3
- Панкратов В. М., Голиков А. В., Панкратова Е. В., Голикова О. В., Маркелова О. В.** Анализ динамики чувствительного элемента балочного типа микромеханического гироскопа путем построения амплитудно-частотных пространственных характеристик. № 1
- Реут В. Р., Койгеров А. С., Андрейчев С. С., Дорохов С. П., Салов А. С.** Новая конструкция многоканальной ПАВ-радиометки на основе многополоскового ответвителя. № 10
- Федоров Ю. В., Бугаев А. С., Гнатюк Д. Л., Павлов А. Ю., Матвеев О. С., Павлов В. Ю., Слаповский Д. Н., Томош К. Н., Енюшкина Е. Н., Галиев Р. Р., Майтама М. В., Зуев А. В., Крапучин Д. В., Гамкрелидзе С. А., Путинцев Б. Г., Мальцев П. П.** Макетирование приемо-передающих модулей 5-миллиметрового диапазона длин волн на базе отечественных монолитных интегральных схем на нитриде галлия . . . № 12
- Хуснутдинов Т. М., Белоглазов Г. В., Евдокимов А. К.** Методика измерения параметров контуров приборов СВЧ на высоком уровне мощности № 10
- Эннс Я. Б., Федоров А. В., Эннс П. Б., Залевская В. А.** Оптимизация конструкции реле, выполненного по объемной технологии МСТ, в целях уменьшения времени срабатывания № 11
- ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ**
- Ангари́та Лорес К. Э., Богатиков Е. В., Бормонтов Е. Н.** Смесительный каскад микрофлюидного чипа с топологией диаграммы Вороного № 9
- Берзин А. А., Морозов А. И., Сигов А. С.** Чисто антиферромагнитная магнитоэлектрическая память на основе Sr_2O_3 № 5
- Гасников А. О., Ершов М. И., Лучинин В. В., Трушлякова В. В.** Информационная уязвимость ЭКБ № 2
- Драгунов В. П., Остертак Д. И., Сеницкий Р. Е.** Анализ микроэлектромеханического генератора с периодическим подключением нагрузки № 9
- Драгунов В. П., Остертак Д. И., Сеницкий Р. Е.** Электростатический микроэлектромеханический генератор с непрерывной генерацией тока в режиме автостабилизации № 1
- Зенченко Н. В.** Исследование тепловых процессов в мощных полевых транзисторах на основе нитрида галлия № 12
- Иванов Е. А., Якунин А. Н.** Альтернативные алгоритмы коммутации силовых транзисторов с квазирезонансной составляющей. № 7
- Камалджит Сингх, Нирмал А. В.** Корпусирование МЭМС-структур для работы в высокочастотной области № 3
- Карушкин Н. Ф., Обухов И. А., Смирнова Е. А.** Полупроводниковые компоненты и устройства электронной техники в коротковолновой части СВЧ диапазона. Часть I. № 3
- Карушкин Н. Ф., Обухов И. А., Смирнова Е. А.** Полупроводниковые компоненты и устройства электронной техники в коротковолновой части СВЧ диапазона. Часть II. № 4
- Карушкин Н. Ф., Обухов И. А., Смирнова Е. А.** Полупроводниковые компоненты и устройства электронной техники в коротковолновой части СВЧ диапазона. Часть III. № 5
- Кулакова А. А., Лукьяненко Е. Б.** Статические триггеры на основе массивов p - и n -канальных МОП-транзисторов № 11
- Кулакова А. А., Лукьяненко Е. Б.** Схемотехника d -триггеров — основных элементов заказных последовательностных СБИС № 7
- Пригодский Д. М., Басов М. В.** Исследование чувствительных элементов давления с повышенной прочностью № 6
- Присянюк В. В., Паршиков Б. Ю., Прудников Н. В., Суворов И. С.** Миниатюрные резервные источники питания на основе энергетических конденсированных систем. № 6
- Смолин В. К.** Принципы исполнения вакуумных микротриодов с планарно-торцевыми катодами № 4
- Тимошенко С. П., Анчутин С. А., Плеханов В. Е., Кочурина Е. С., Мусаткин А. С., Тимошенко А. С.** Исследование кольцевого микрогироскопа № 10

- Торгашин С. И., Пауткин В. Е.** Особенности применения схем компенсации углового рас-
травливания при формировании МЭМС-
структур. № 3
- Фомина К. С., Пилькевич А. В., Садков В. Д.** Оп-
тимизация топологии пленочных чип-элемен-
тов ВЧ и СВЧ аттенюаторов № 9
- Хабибуллин Р. А.** Современное состояние и
перспективы создания квантово-каскадных
лазеров терагерцового диапазона частот в Рос-
сии № 12
- Хмельницкий И. К., Айвазян В. М., Алексеев Н. И.,
Бройко А. П., Городилов В. В., Каленов В. Е.,
Корляков А. В., Лагош А. В., Лучинин В. В., Тес-
тов Д. О.** Актуаторные ИПМК-преобразовате-
ли с системой обратной связи на основе
ИПМК-сенсора № 2
- Черепанов А. А., Новиков И. Л., Васильев В. Ю.**
Считывающая электроника для СКВИД-магни-
тометров постоянного тока. Часть 1. Маг-
нитометры постоянного тока и их ограниче-
ния № 1

- Черепанов А. А., Новиков И. Л., Васильев В. Ю.**
Считывающая электроника для СКВИД-магни-
тометров постоянного тока. Часть 2. Системы
считывания и их ограничения. № 4

- Черепанов А. А., Новиков И. Л., Васильев В. Ю.**
Считывающая электроника для СКВИД-магни-
тометров постоянного тока. Часть 3. Полупро-
водниковая криогенная электроника. . . . № 5

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

- Абрамов И. И.** Сознание человека, или возможнос-
ти электроники. Часть III № 9
- Волобуев А. Н.** Особенности ультразвукового
исследования структур с подвижными грани-
цами № 7
- Волобуев А. Н.** О некоторых проблемах создания
искусственного интеллекта: стохастическая
функция мозга № 10

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 24.10.2019. Подписано в печать 22.11.2019. Формат 60×88 1/8. Заказ МС1219. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье Ю. В. Федорова, А. С. Бугаева, Д. Л. Гнатока, А. Ю. Павлова, О. С. Матвеевко, В. Ю. Павлова, Д. Н. Слаповского, К. Н. Томоша, Е. Н. Енюшкиной, Р. Р. Галиева, М. В. Майтамы, А. В. Зуева, Д. В. Крапухина, С. А. Гамкредидзе, Б. Г. Путинцева, П. П. Мальцева
«МАКЕТИРОВАНИЕ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ 5-МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН НА БАЗЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ»

Yu. V. Fedorov, A. S. Bugayev, D. L. Gnatyuk, A. Yu. Pavlov, O. S. Matveyenko, V. Yu. Pavlov, D. N. Slapovsky, K. N. Tomosh, E. N. Enyushkina, R. R. Galiyev, M. V. Maytama, A. V. Zuev, D. V. Krapukhin, S. A. Gamkrelidze, B. G. Putintsev, P. P. Maltsev

«PROTOTYPING OF V-BAND TRANSMIT-RECEIVE MODULES ON THE BASIS OF THE DOMESTIC MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUITS ON GALLIUM NITRIDE»

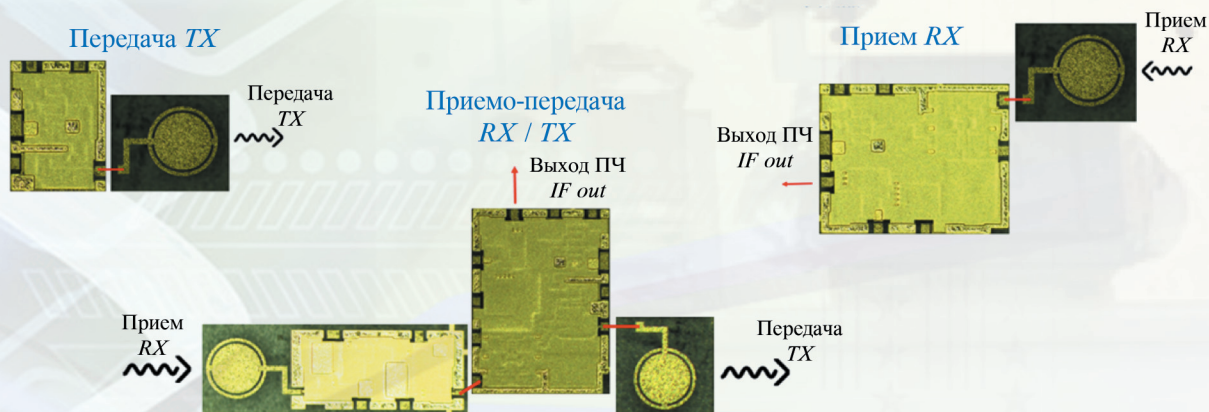


Рис. 1. Варианты применения МИС серии 5411 для реализации функций приемо-передачи радиосигнала

Fig. 1. Ways for use of 5411 series MMICs for realization of the transmit-receive functions of a radio signal

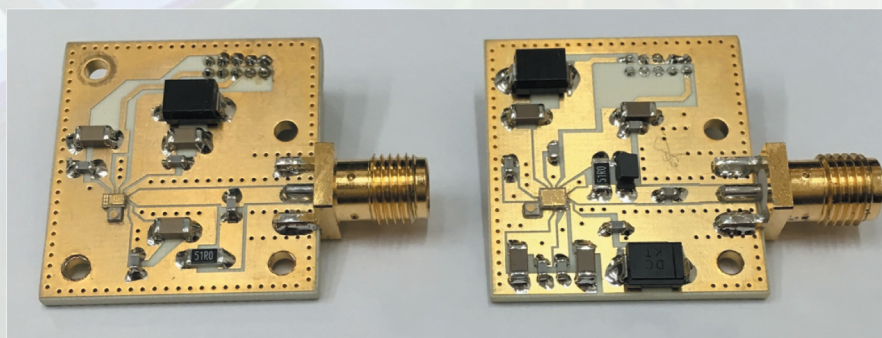
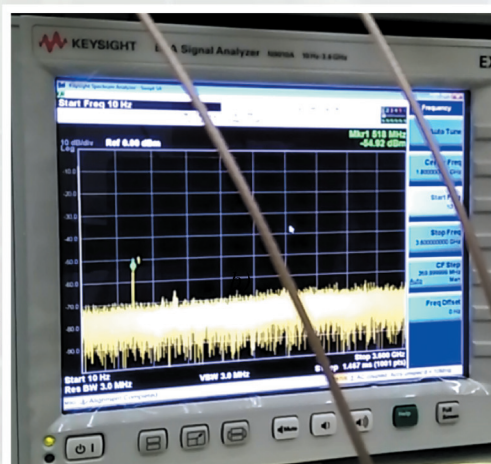


Рис. 2. Гибридное исполнение макетов передатчика и приемника 5-миллиметрового диапазона длин волн

Fig. 2. Hybrid version of the prototypes of V-band transmitter and receiver

Рис. 3. Фотография экрана анализатора спектра во время тестирования макетов в режиме имитации радиолинии связи

Fig. 3. Photo of the spectrum analyzer screen during testing of the prototypes in the mode of imitation of a radio communication line



Рисунки к статье Н. В. Зенченко

«ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МОЩНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ»

N. V. Zenchenko

«RESEARCH OF THE THERMAL PROCESSES IN HIGH-POWER FIELD-EFFECT TRANSISTORS BASED ON GALLIUM NITRIDE»

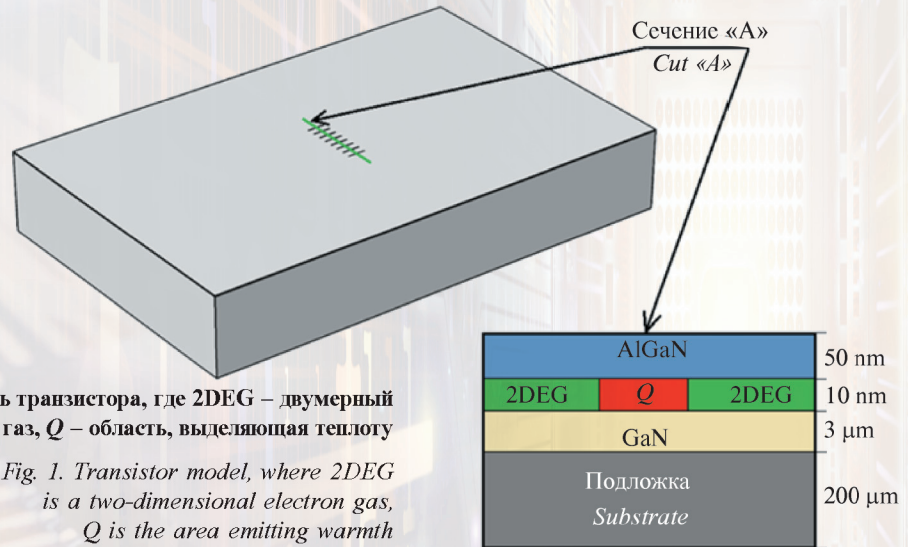


Рис. 1. Модель транзистора, где 2DEG – двумерный электронный газ, Q – область, выделяющая тепло

Fig. 1. Transistor model, where 2DEG is a two-dimensional electron gas, Q is the area emitting warmth

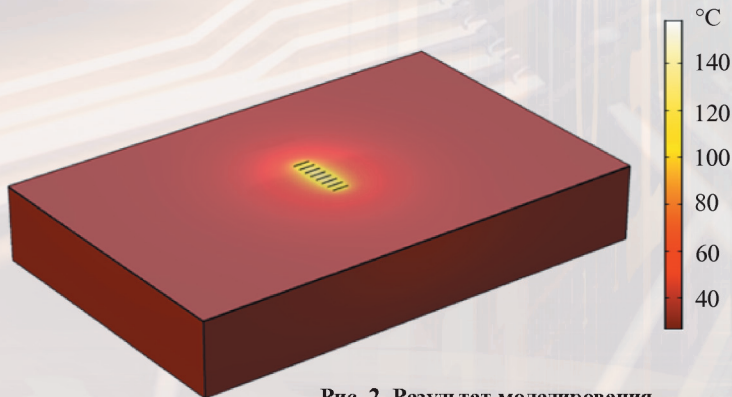


Рис. 2. Результат моделирования. Поверхностное распределение температуры

Fig. 2. Result of modeling. Surface distribution of temperature

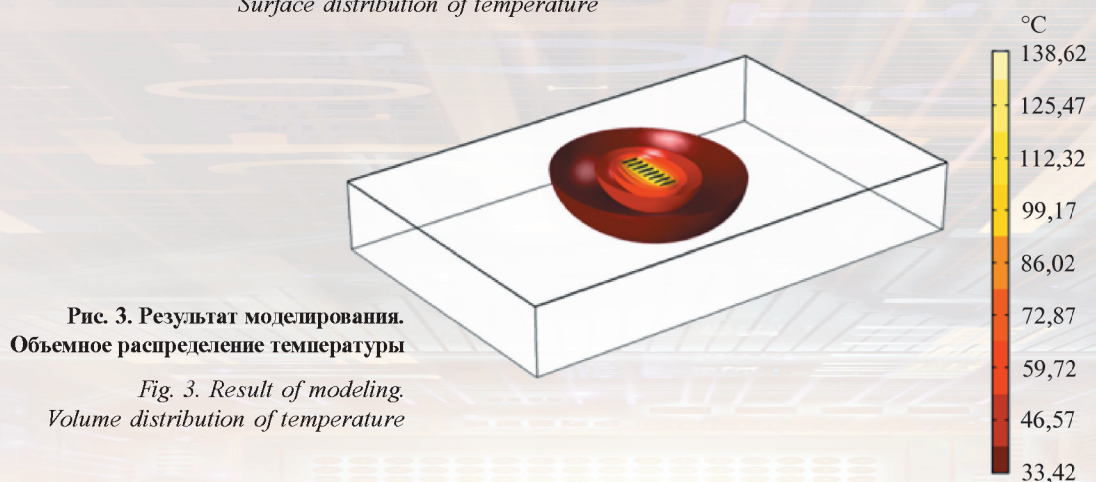


Рис. 3. Результат моделирования. Объемное распределение температуры

Fig. 3. Result of modeling. Volume distribution of temperature