

ISSN 1813-8586

# НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 21, № 3, 2019

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

# NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

Vol. 21, No. 3, 2019

The articles are published  
in Russian and English



# VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»



**Конференция состоится 3–6 июня 2019 г. в Санкт-Петербурге.**

## Организаторы конференции:



Министерство науки  
и высшего образования  
Российской Федерации



Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» (СПбГЭТУ)



ОАО  
«НПП «Исток»  
им. Шокина»

## Генеральный спонсор



Компания Роде и Шварц

Конференция будет проводиться на базе университетского комплекса СПбГЭТУ  
(улица Профессора Попова, д.5).

Для студентов и аспирантов ВУЗов Российской Федерации  
участие в Конференции бесплатно.

Доклады, присланные для включения в сборник трудов конференции,  
будут проиндексированы Российским индексом научного цитирования (РИНЦ).

На конференции будет представлен широкий спектр оборудования Rohde and Schwarz.  
Возможно проведение измерений параметров устройств участников конференции.

Рабочий язык конференции – русский.

## Оргкомитет Конференции

+7 (812) 234-99-83 • 2019@mwelectronics.ru

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 21. № 3 ✧ 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

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

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

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

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.

Фокин В. А., к.х.н. (ред. перевода)

Щетинкин Д. А. (сайт)

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

**Васильев В. Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 7. Обобщение информации по методам осаждения и особенностям пленок . . . . . 131

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

**Новиков С. Г., Кадочкин А. С., Беринцев А. В., Светухин В. В., Алексеев А. С.** Моделирование радиоломинесцентных композиций на основе микрочастиц  $^{63}\text{Ni}$  для радиоизотопных источников электрического питания . . . . . 143

**Масальский Н. В.** Расширенный подход к моделированию вольт-амперных характеристик КНИ МОП-транзистора . . . . . 153

### ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

**Карушкин Н. Ф., Обухов И. А., Смирнова Е. А.** Полупроводниковые компоненты и устройства электронной техники в коротковолновой части СВЧ диапазона. Часть I . . . . . 165

**Камалджит Сингх, Нирмал А. В.** Корпусирование МЭМС-структур для работы в высокочастотной области . . . . . 178

**Торгашин С. И., Пауткин В. Е.** Особенности применения схем компенсации углового растривания при формировании МЭМС-структур . . . . . 186

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](mailto:nmst@novtex.ru)

### Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

# NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586



**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  
 Labunov V. A. (Belorussia), Sci. (Tech.), Acad. NASB  
 Ryzhii V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS  
 Saurov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS  
 Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS  
 Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS

**Editorial board:**

Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
 Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
 Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof.  
 Baklanov M. R., Dr. Sci. (Chem.), Prof. (China)  
 Basaev A. S., Cand. Sci. (Phys.-Math.)  
 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.  
 Fokin V. A., Cand. Sci. (Chem.)  
 Shehetinkin D. A. (site)

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

## CONTENTS

**SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST**

**Vasilyev V. Yu.** Silicon Nitride Thin Film Deposition for Microelectronics and Microsystem Technologies. Part 7. Summary on the Deposition Methods and Basic Film Features . . . . . 137

**MODELLING AND DESIGNING OF MNST**

**Novikov S. G., Kadochkin A. S., Berintsev A. V., Svetukhin V. V., Alekseyev A. S.** Simulating of Radioluminescent Compositions based on Microparticles of <sup>63</sup>Ni for Radioisotope Power Sources . . . . . 149

**Masalsky N. V.** Expanded Approach for Simulation of I-V data to the SOI CMOS Transistor . . . . . 160

**MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS**

**Karushkin N. F., Obukhov I. A., Smirnova E. A.** Semiconductor Components and Electronic Technology Devices in the Short Wave Section of the Microwave Radiation. Part I . . . . . 172

**Kamaljeet Singh, Nirmal A. V.** Packaging Solutions for MEMS Structures in Radio Frequency Domain . . . . . 183

**Torgashin S. I., Pautkin V. E.** Specific Features of Application of the Compensation Versions for Angle Etching during Formation of MEMS . . . . . 190

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

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

УДК 661.571.1 + 539.23 + 621.3.049.771 + 681.586

DOI:10.17587/nmst.21.131-142

**В. Ю. Васильев**, д-р хим. наук, проф., e-mail: vasilev@corp.nstu.ru,  
Новосибирский государственный технический университет,  
зам. ген. директора ООО "СибИС", г. Новосибирск

## ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ. ЧАСТЬ 7. ОБОБЩЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ПО МЕТОДАМ ОСАЖДЕНИЯ И ОСОБЕННОСТЯМ ПЛЕНОК

Поступила в редакцию 27.06.2018

*В части 7 проведено обобщение совокупности экспериментальных данных для шести основных методов получения тонких пленок нитрида кремния (ТПНК), проанализированных в частях 1–6 настоящей работы. Результаты обобщения приведены в виде температурных областей типичных диапазонов изменения скоростей осаждения, состава (отношения Si/N и концентрации водорода), плотности и механических напряжений ТПНК для каждого метода. Приведенные обобщенные результаты позволяют наглядно сравнивать основные характеристики процессов осаждения и параметры ТПНК, а также проводить оценку применимости рассмотренных методов получения ТПНК для решения конкретных задач микроэлектронных и МЭМС-технологий.*

**Ключевые слова:** нитрид кремния, тонкие пленки, обобщение характеристик методов получения, интегральные микросхемы, микросистемная техника

### Введение

Использование нитрида кремния в электронике началось примерно с середины 1970-х годов. Этот диэлектрический материал привлек внимание уникальностью свойств и возможностью его получения в виде тонких пленок (ТП), прекрасно совместимых с технологией кремниевых интегральных микросхем (ИМС), в то время делающих первые шаги в направлении повышения степени интеграции. Уже на первом этапе исследований методов получения тонких пленок нитрида кремния (ТПНК) и свойств материала были сформулированы задачи их получения как при высоких температурах (для изготовления изоляции и транзисторных структур в ИМС), так и при низких температурах (для финишной пассивации ИМС) [1–3].

Получение близких по составу к стехиометрическим ТПНК (далее С-ТПНК, химическая формула  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , соотношение  $\text{Si}/\text{N} = 0,75$ ) проводилось при высоких температурах методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) с участием моносилана, хлоридов кремния и аммиака. Основ-

ным промышленным реагентом в итоге был выбран дихлорсилан  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ . При низкотемпературном плазмохимическом осаждении (ПХО) с участием различных кремнийсодержащих веществ (в основном — моносилана), а также аммиака и азота, получали нестехиометрические кремний-азот-водородсодержащие тонкие пленки (далее КАВ-ТП, соотношение  $\text{Si}/\text{N}$  может существенно отличаться от  $\text{Si}/\text{N} = 0,75$  в обе стороны). Зачастую такие пленки также неправильно называют термином "нитрид кремния".

В начале 1980-х годов появились первые обобщения исследований ТПНК, из которых как наиболее полные необходимо отметить обзор [4] и монографию [5]. Несколько позже по времени изданы объемная библиографическая подборка литературы [6], в которой систематизирована обширная изданная литература по широкому кругу вопросов, связанных с ТПНК, а также обзорная публикация [7]. В источнике [6] в том числе обобщены работы по применению ТПНК в рассматриваемых на то время перспективными технологиях ИМС и в дру-

гих приборах. В качестве примеров обзорных публикаций по структуре и представляющим самостоятельный интерес электрофизическим эффектам в ТПНК можно привести работы [8—11]. Из недавних по времени работ необходимо упомянуть реферативно-аналитические обзорные публикации [12, 13].

По мнению автора настоящего обзора во всех указанных публикациях вопросы собственно получения ТПНК рассмотрены неприемлемо кратко, в результате чего проследить взаимосвязи тех или иных свойств ТПНК с условиями их получения оказывается невозможным. Кроме того, в последние десятилетия во многих оригинальных публикациях данные об условиях получения ТП вообще не приведены, что делает такие работы малоинформативными. В связи с этим автор посчитал необходимым обобщить и структурировать накопленную информацию о методах получения ТПНК, их структуре и основных свойствах. В итоге в работах [14—19] были проанализированы состояние и направления развития шести основных технологических методов получения ТПНК, применяемых в технологиях ИМС и нано- и микроэлектромеханических систем (МЭМС). При глубине поиска в несколько десятилетий были рассмотрены следующие методы (которые, соответственно, в тексте далее обозначены цифрами 1 — 6):

- метод 1 — в проточных реакторах при химическом осаждении из газовой фазы (ХОГФ) с термической активацией [14];
- метод 2 — в реакторах циклического действия при термически активированном атомно-слоевом осаждении (ТА-АСО) [15];
- метод 3 — в реакторах проточного типа при плазмохимическом осаждении (ПХО) [16];
- метод 4 — в реакторах проточного типа при плазмохимическом осаждении с активацией плазмой высокой плотности (ПХО с ПВП) [17];
- метод 5 — в реакторах циклического действия при плазменной активации АСО (ПА-АСО) [18];
- метод 6 — в реакторах проточного типа с так называемым "каталитическим осаждением" (К-ХОГФ) [19], т. е. при термической реакции гидридов кремния и азота на раскаленной вольфрамовой нити.

### Постановка задач обзора

В работе [20] был сформулирован обобщенный подход к описанию и анализу процессов получения ТП различного типа с участием газозольных реакций. Подход состоял в выделении четырех основных зависимостей: "выходных" характеристик процесса осаждения от "входных" параметров процессов (температуры, давления, концентраций ре-

агентов и т. д.). Таковыми важнейшими для технологии ТП характеристиками процессов являются:

- 1) скорость осаждения (скорость наращивания) ТП;
- 2) состав ТП;
- 3) физико-химические свойства ТП;
- 4) электрические и электрофизические свойства ТП.

Цель настоящей части обзора — систематизация данных работ [14—19] для первых трех выделенных выше характеристик применительно к различным методам осаждения и типам ТПНК. Такой анализ охватывает подавляющее большинство технологических применений ТПНК и необходим для формирования целостного сравнительного взгляда на возможности различных методов осаждения ТПНК. Автор хотел бы подчеркнуть, что в данной работе не рассматриваются электрические и электрофизические свойства ТПНК (четвертый тип характеристики ТПНК). Причина этого состоит в существенно меньшем объеме публикаций для ограниченных методов получения и специфического использования ТП, выходящего за рамки данного обзора. Некоторые подобного рода сведения могут быть найдены, например, в публикациях [10, 11].

В настоящей работе основным "входным" параметром для обобщения итоговой информации о процессах осаждения была выбрана температура осаждения ТПНК ( $T_d$ ). Высокотемпературные методы ХОГФ ( $T_d > \sim 700$  °С) позволяют получать С-ТПНК. При меньших температурах формируются в зависимости от метода получения в большей или меньшей степени нестехиометрические КАВ-ТП. Однако и в последнем случае путем манипуляций с составом газовых смесей и условиями осаждения могут быть получены ТПНК, формально близкие по составу к стехиометрии. Это происходит в случае принятия во внимание в качестве характеристики состава только соотношения  $Si/N = 0,75$ , однако, как будет показано ниже, соотношение  $Si/N$  не является исчерпывающей характеристикой состава КАВ-ТП.

При анализе в настоящей работе рассматривались обобщенные величины характеристик и параметров, исходные сведения о которых могут быть найдены в частях 1—6 настоящей работы [14—19].

### Температурные зависимости скоростей осаждения ТПНК

На рис. 1 очерчены и по-разному заштрихованы примерные области значений скоростей осаждения ( $W$ ) для методов осаждения 1—6 при типичных для них температурных интервалах. Эти области являются скорее референсными, поскольку внутри заштрихованных областей также имеет место некоторое изменение скорости осаждения.

Однако удобство такого представления состоит в том, что с помощью очерченных областей оказалось возможным наглядно визуализировать возможности методов получения ТПНК, а также перейти к обобщениям о составе и основных свойствах пленок. Далее в работе сохраняются выбранные типы штриховки областей для рассматриваемых методов осаждения 1–6.

К приведенным на рис. 1 данным можно сделать следующие комментарии:

- значения скоростей осаждения для методов 1–6 различаются более, чем на четыре порядка;

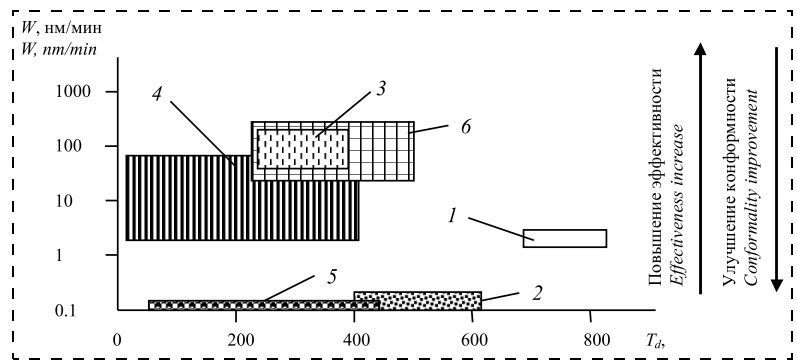
- методы ТА-АСО 2 и ПА-АСО 5, реализованные, как правило, в циклических реакторах индивидуального типа (то есть на одну подложку), позволяют получать пленки с крайне малыми скоростями осаждения, менее 0,1 нм/мин [15, 18].

В данном случае автор считает допустимым использовать размерность нм/мин вместо типичных для процессов АСО размерностей нм/цикл, поскольку длительность циклов при обоих изученных вариантах АСО составляла минуту и более. Из приведенных данных можно видеть, что описанные в литературе методы АСО в настоящее время по своему статусу скорее не пригодны для использования и требуют дальнейших исследований;

- плазмоактивированные методы ПХО (3) и ПХО с ПВП (4) и каталитический метод (6) в проточных реакторах, чаще всего индивидуального типа, позволяют получать очень высокие скорости осаждения;

- высокотемпературный метод ХОГФ (1) позволяет достичь промежуточных значений скоростей осаждения. Однако благодаря его реализации в объемных проточных трубчатых реакторах с одновременной загрузкой около 100 подложек обеспечивается высокая производительность процесса. Трубчатые высокотемпературные реакторы с горячими стенками широко применяются в производстве ИМС и МЭМС для получения С-ТПНК при использовании смесей  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2\text{—NH}_3$ .

Редким, но интересным для осаждения при высоких температурах из смеси  $\text{SiH}_4\text{—NH}_3$  является проточный реактор индивидуального типа с горячими стенками, названный SiNergy™ (Applied Materials, Inc.) [21]. Преимуществом такого реактора можно считать существенно меньшие совокупные термические воздействия в сравнении с традиционным методом ХОГФ в трубчатых реакторах. Это обусловлено большими, до 200 нм/мин, скоростями наращивания пленок ввиду использования более чем на 2...2,5 порядка больших рабочих давлений (скорость осаждения как правило, прямо пропор-



**Рис. 1.** Примерные диапазоны значений скоростей осаждения для температурных интервалов, в которых осаждение ТПНК проводится следующими методами: 1 – ХОГФ [14]; 2 – ТА-АСО [15]; 3 – ПХО [16]; 4 – ПХО с ПВП [17]; 5 – ПА-АСО [18]; 6 – К-ХОГФ [19] (см. пояснения в тексте)

*Fig. 1.* Approximate ranges of the deposition rate values for the temperature intervals, in which the deposition of SNTF is carried out by the methods of LPCVD – 1 [14]; TA-ALD – 2 [15]; PECVD – 3 [16]; HDP-CVD – 4 [17]; PA-ALD – 5 [18]; Cat-CVD – 6 [19]. See the text for details

циональна давлению в реакторе). Преимуществом использования моносилана является также пониженная дефектность пленок ввиду отсутствия хлора в исходной молекуле. Это снимает проблему формирования микрочастиц хлорида аммония  $\text{NH}_4\text{Cl}$  и иных хлорсодержащих составов в газовой фазе и на стенках вакуумных систем, характерных для хлоридов кремния. Автор хотел бы отметить еще одно потенциальное преимущество такого реактора. Представляется, что в подобных реакторах путем изменения соотношения компонентов в газовой фазе можно получать однородные по составу высокотемпературные пленки с обогащением по кремнию (ОК-ТПНК). Такие пленки, по данным источников [22–24], представляют интерес для использования в МЭМС-технологиях. Как обсуждалось в работе [14], получение ОК-ТПНК в трубчатых проточных реакторах при ХОГФ невозможно ввиду сильного изменения концентраций компонентов по длине рабочей зоны, чего принципиально лишен обсуждаемый индивидуальный реактор. Получение очень тонких пленок С-ТПНК достаточно узкого назначения также возможно методом быстрого термического осаждения (Rapid Thermal CVD, RT-CVD) из смесей  $\text{SiH}_4\text{—NH}_3$  [25]. В интервале 700...850 °С скорости наращивания в реакторах индивидуального типа составляют 50...300 нм/мин, при этом давление в реакторе на порядок превышает давление в "классических" трубчатых реакторах ХОГФ.

Кратко характеризуя обсуждаемые в литературе схемы процессов осаждения ТПНК, автор хотел бы отметить, что для методов 1, 2, 5 процессы описывались как протекающие по многостадийным схемам с лимитирующими гетерогенными стадиями. В таких процессах поверхность подложки является активным компонентом реакции. В то же время плазмоактивированные процессы протека-

ют в газовой фазе, как правило, без участия или с минимальным участием поверхности подложек. Некоторым исключением из этого могут считаться отдельные процессы ПА-АСО, для которых плазменная активация одного из компонентов реакции может повышать вклад поверхностных реакций.

Для характеристики и сравнения кинетических особенностей процессов осаждения автор в работе [20] ввел универсальную характеристику процессов осаждения ТП (в том числе применимую и для процессов получения ТПНК), названную эффективной константой скорости реакции  $k_{eff}$ , с размерностью сантиметр в секунду (см/с) ( $k_{eff} \sim W/[C_{Si}]$ ), где  $[C_{Si}]$  — концентрация основного кремнийсодержащего реагента в газовой фазе, моль/л. Высокие скорости осаждения плазмо- и каталиически-активированных процессов однозначно соответствуют большим значениям  $k_{eff}$ . При этом необходимо отметить, что возрастание  $W$  (т. е.  $k_{eff}$ ) также прямо коррелирует с повышением эффективности использования реагентов, что отображено стрелкой в правой части рис. 1. Однако увеличение  $W$  (т. е.  $k_{eff}$ ) имеет и негативный эффект — оно приводит к ухудшению конформности осаждения ТПНК на развитых рельефах приборов. Это на том же рис. 1 показано стрелкой с направлением в обратную сторону относительно стрелки для эффективности использования реагентов. Таким образом, применение высокоскоростных процессов целесообразно для подложек без рельефа или с минимально

развитым рельефом, в то время как низкоскоростные процессы позволяют получать существенно более конформные покрытия [20]. Исключение составляет совмещенный процесс осаждения с ПВП и одновременным травлением ТП, специально разработанный для получения конформных покрытий на высокоаспектных структурах [17].

### Температурные зависимости состава ТПНК

В качестве основных характеристик состава ТПНК автор выбрал отношение Si/N и общую концентрацию водорода в пленке. Последняя характеристика особо актуальна для низкотемпературных методов осаждения. Отметим, что для определения отношения Si/N авторы публикаций использовали различные прямые методы определения кремния и азота, в том числе с профилированием элементов по толщине пленок: Оже-спектроскопию (AES); рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию (XPS); вторично-ионную масс-спектрометрию (SIMS); спектроскопию резерфордского обратного рассеяния (RBS); метод детектирования атомов отдачи (ERDA) и т. д., а для определения водорода — SIMS, RBS, ERDA, методы ядерных реакций (NMR), а также широко распространенную предварительно откалиброванную инфракрасную спектроскопию с Фурье-преобразованием, позволяющую фиксировать концентрации Si-N и N-N связей в ТПНК.

Данные рис. 2, а, указывают на практически стехиометрический состав высокотемпературных пленок (С-ТПНК, Si/N = 0,75), при всего нескольких атомарных процентах содержания водорода (рис. 2, б). Однако для низкотемпературных плазмоактивированных КАВ-ТП возможен очень широкий диапазон соотношения Si/N с некоторым общим трендом к обогащению по кремнию. При некоторых условиях процессов осаждения (в основном при подборе соотношений кремниевого и азотных компонентов реакций) и для КАВ-ТП оказывается возможным достичь формального стехиометрического соотношения Si/N = 0,75. Однако такие пленки нельзя называть стехиометрическими ввиду значительного присутствия в них водорода (рис. 2, б), в разы превышающего содержание водорода в высокотемпературных С-ТПНК (включая полученные в индивидуальных реакторах [21, 25]). Из низкотемпературных наименьшие сравнительные концентрации водорода в КАВ-ТП наблюдали для пленок, полученных методом 4 (ПХО с ПВП), где обычно применяют смеси SiH<sub>4</sub>—N<sub>2</sub>. Максимальные значения со-

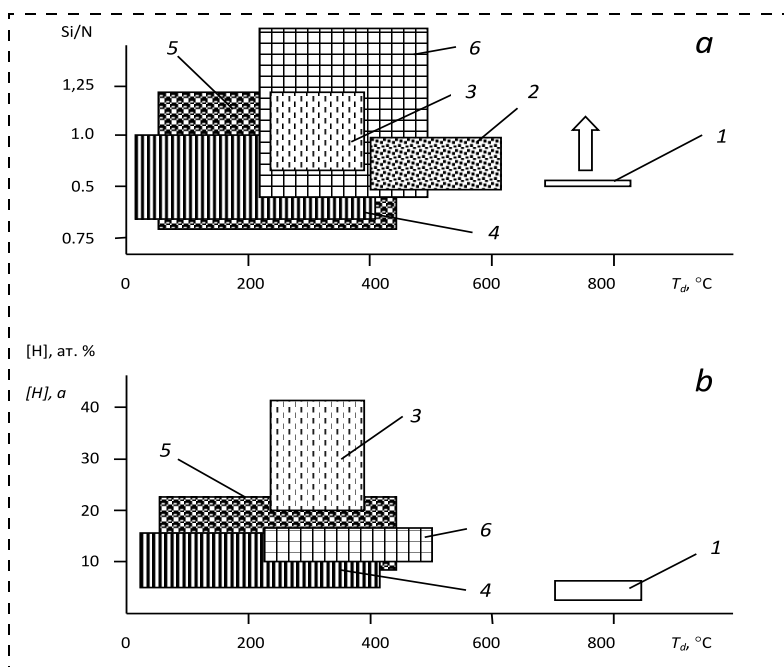


Рис. 2. Примерные диапазоны значений отношения Si/N (а) и общей концентрации водорода (б), характеризующие составы ТПНК, полученные методами 1—6 при соответствующих им примерных температурных интервалах (см. пояснения в тексте)

Fig. 2. Approximate ranges of the Si/N ratio (a), and total concentration of hydrogen (b), characterizing the SNTF compositions obtained by methods 1—6 at the corresponding approximate temperature intervals. See the text for details



держания водорода (до 40 ат. %) зафиксированы для процессов ПХО с использованием смесей  $\text{SiH}_4\text{—NH}_3$ . В целом данные рис. 2, *b* отвечают тренду снижения концентрации водорода в ТПНК при повышении температуры получения пленок [5].

Автор хотел бы подчеркнуть, что в технологиях ИМС и МЭМС тонкие пленки часто подвергаются термическому отжигу при повышенных температурах. В этом случае необходимо принимать во внимание информацию из источников [26, 27] об удалении водорода из пленок при температурах выше примерно 500...600 °С, что приводит к изменению состава и структуры пленок. Проблема присутствия водорода в ТПНК, по мнению автора, представляет интерес для отдельной публикации.

Что касается присутствия в ТПНК иных элементов, например, хлора, кислорода, углерода, то здесь необходимыми являются следующие комментарии:

- в высокотемпературных пленках наличие примесных элементов (остаточных элементов из исходных реагентов) фиксируется на уровне ниже предела обнаружения методов анализа;

- в низкотемпературных пленках, получаемых методами АСО из хлорпроизводных моносилана [14, 18], отмечались эффекты аномально высокоскоростного растворения покрытий и их окисления на воздухе после извлечения из реакционных камер. По информации работы [5] во время смешения хлоридов кремния и аммиака при низких температурах происходит формирование растворимых в воде порошкообразных продуктов: силикоимидов  $\text{SiN}_2\text{H}_2$ , гексахлордисилазана  $\text{Si}_2(\text{NH})\text{Cl}_6$  и др. Таким образом, состав и структура получаемых при этом покрытий могут быть сложнее обычного КАВ-ТП, как следствие присутствия хлора и легко окисляющихся на воздухе водородсодержащих групп. Однако эти продукты, по данным [5], могут трансформироваться в нитрид кремния при существенном повышении температуры процесса или отжига ТП.

Автор хотел бы также прокомментировать активное привлечение многими авторами для характеристики состава ТПНК значений показателя преломления  $n$ . Методы определения  $n$  являются простыми, аппаратно совершенными, точными и, как следствие, широко распространенными в промышленности ИМС и МЭМС для контроля составов ТП. Однако применительно к ТПНК необходимо отметить следующее. Показатель преломления для С-ТПНК обычно принят на уровне  $2,0 \pm 0,02$ , но в случае присутствия в ТПНК примесей водорода и кислорода  $n$  существенно снижается (до 1,7...1,8), а при повышении отношения  $\text{Si}/\text{N}$  — значительно повыша-

ется (например, при  $\text{Si}/\text{N} = 1,42$  значение  $n = 2,5$  [28]). Таким образом при исследованиях ТПНК с варьированием состава в широком диапазоне трактовка результатов с помощью измерения  $n$  может приводить к ошибочным выводам.

### Температурные зависимости основных физико-химических свойств ТПНК

В литературе обсуждаются различные физико-химические характеристики ТПНК. Чаще всего анализируется методически простая и доступная большинству авторов скорость растворения ТПНК в растворах на основе фтористоводородной кислоты. По данным разных авторов скорости растворения проявляют тренд к снижению с повышением температуры осаждения пленок. Кроме того, повышение концентрации водорода приводит к повышению скоростей растворения [29]. Проблемы, однако, состоят в том, что составы растворителей у разных авторов сильно различаются, ТПНК получают при различных температурах, на травление сильно влияют состав пленок, условия травления, и т. д. Таким образом, технологически удобная характеристика ТПНК по своей сути может рассматриваться только как вторичная, а для сравнительного анализа свойств ТПНК — малоприменимая.

В связи с этим автор для сравнительного анализа сделал выбор в пользу первичной характеристики ТПНК — плотности пленки ( $\gamma$ ), хотя эту характеристику исследовали в значительно меньшем числе работ. Значение плотности для С-ТПНК составляет 2,9...3,1 г/см<sup>3</sup> (рис. 3), что фактически близко к известному справочному значению для объемного материала — 3,17 г/см<sup>3</sup>. Диапазоны изменения плотности для активированных методов осаждения на рис. 3 показывают тренд к снижению плотности низкотемпературных КАВ-ТП, что коррелирует с трендами возрастания концентрации водорода и обогащения по кремнию (справочная плотность кремния — 2,33 г/см<sup>3</sup>). Для последнего случая, например, в работе [30] была продемонстрирована прямая зависимость снижения  $\gamma$  в интервале 3,0...2,0 при снижении  $\text{Si}/\text{N}$  в интервале 0,75...0,5. Естественно, что скорости растворения

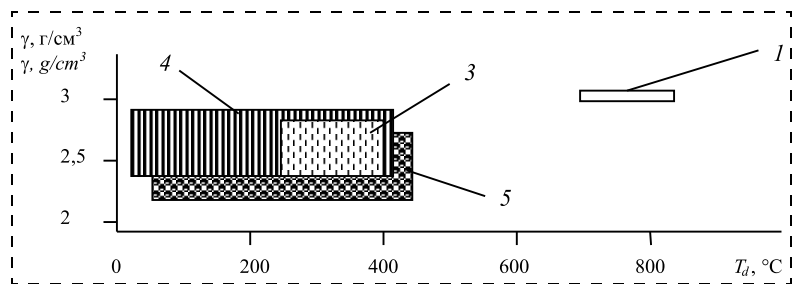


Рис. 3. Примерные диапазоны значений плотности ТПНК, полученных методами 1, 3, 4, 5 при соответствующих им примерных температурных интервалах  
Fig. 3. Approximate ranges of SNTF density values obtained by methods 1, 3, 4, 5 at the corresponding approximate temperature intervals

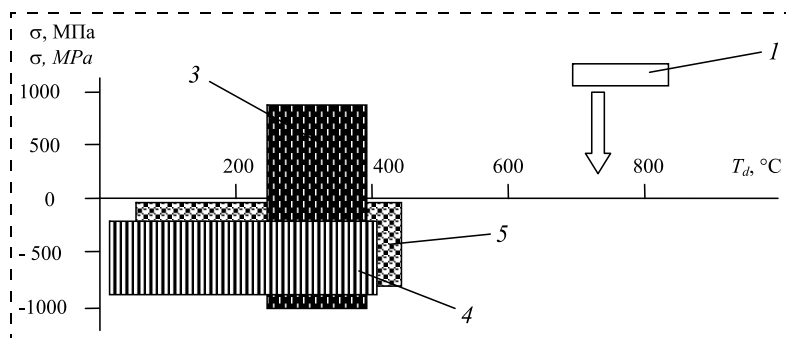


Рис. 4. Примерные диапазоны значений механических напряжений в ТПНК, полученных методами 1, 3–5 при соответствующих им примерных температурных интервалах (см. пояснения в тексте)

Fig. 4. Approximate ranges of the mechanical stress values in SNTF, obtained by methods 1, 3–5 at the corresponding approximate temperature intervals. See the text for details

КАВ-ТП проявляют обратную зависимость от плотности пленок [31].

Для МЭМС-технологий актуальнейшим параметром ТП является значение механических напряжений. Для ТПНК по результатам обобщений [14–19] знак и значение механических напряжений зависят от очень многих факторов, в связи с чем этот вопрос требует отдельного обсуждения вне рамок настоящей работы. Полезные для сравнения референсные диапазоны механических напряжений ( $\sigma$ ) для разных методов получения ТПНК [14, 16–19] очерчены на рис. 4. Можно видеть, что для С-ТПНК характерны максимальные значения растягивающих (*tensile*, знак плюс) механических напряжений. Вариант значительного снижения величин напряжений для С-ТПНК был продемонстрирован в работе [22, 23] путем обогащения пленки по кремнию и в работе [23] в 1,5 раза путем повышения температуры осаждения для смеси  $\text{SiH}_4\text{—NH}_3$ . Для первого случая это показано блочной стрелкой на рис. 4 и соответствующей ей стрелкой на рис. 2, а, для уровня изменения отношения Si/N.

Напротив, для активированных процессов в КАВ-ТП обычно наблюдается скорее сжимающий (*compressive*, знак минус) тип напряжения. Сравнение данных на рис. 4 показывает, что наибольшие возможности варьирования знака и значений механических напряжений дает метод 3. Например, результаты многофакторных экспериментальных исследований в работе [32] показали, что тренд в сторону растягивающих напряжений проявляется при повышении температуры осаждения и частоты возбуждения плазмы, а также при повышении температуры последующего за осаждением термического отжига.

## Заключение

Проанализированы состояние и направления развития шести основных методов получения

ТПНК для ИМС и МЭМС-приложений. Такими методами являются методы осаждения в реакторах проточного и циклического типов при термической активации исходных реагентов, при плазменной активации, а также метод каталитического осаждения с применением разложения исходных реагентов на горячей нити. Подробный анализ технологий получения, особенностей, направлений развития конкретных процессов приведены в соответствующих частях настоящей работы [14–19]. Анализ проводили по основным публикациям за несколько десятков лет исследований, он включал особенности оборудования, сопоставление преимуществ и недостатков применяемых химических реагентов, используемые параметры процессов и т. д.

Приведенные в части 7 обзорной работы сравнительные обобщенные данные в виде температурных областей для скоростей осаждения, состава и основных свойств ТПНК показывают особенности проанализированных методов осаждения. Это позволяет помимо наглядного сравнения основных характеристик процессов осаждения и параметров ТП проводить оценку применимости основных методов получения ТП для решения конкретных задач микроэлектронных и МЭМС-технологий.

## Список литературы

1. Adams A. C. Dielectric and Polysilicon Film Deposition // VLSI Technology. 2<sup>nd</sup> edition. Ed. by Sze S. M.: McGraw-Hill Int. Edition, 1988. P. 233–271.
2. Ting C. H. Inorganic Dielectrics // Handbook of Multi-level Metallization for Integrated Circuits. Eds. S. R. Wilson, C. J. Tracy, J. L. Freeman. Park Bridge, NJ.: Noyes Publications, 1993. P. 202–273.
3. Cheng H. C. Dielectric and Polysilicon Film Deposition // ULSI Technology. Ed. by C. Y. Chang and S. M. Sze. McGraw-Hill Int. Edition. 1996. P. 205–269.
4. Morosanu C. E. The Preparation, Characterization and Application of Silicon Nitride Films // Thin Solid Films. 1980. Vol. 65. N 1/2. P. 171–208.
5. Silicon nitride in Electronics / Ed. by Rzhantov A. V. Elsevier Science Publishers B. V., 1988. 263 p.
6. Gmelin Handbook of Inorganic and Organometallic Chemistry. Silicon Supplement Vol. B. 5 c. Silicon Nitride in Microelectronics and Solar Cells / Ed. by Pebler A.: 8<sup>th</sup> Edition, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 1991. 401 p.
7. Андриевский Р. А. Нитрид кремния — синтез и свойства // Успехи химии. 1995. Т. 64, № 4. С. 311–329.
8. Гриценко В. А. Электронная структура нитрида кремния // Успехи физических наук. 2012. Т. 182, № 5. С. 1–11.
9. Гриценко В. А. Аморфная структура аморфных нестехиометрических оксидов и нитридов кремния // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, № 7. С. 727–737.
10. Насыров К. А., Гриценко В. А. Механизмы переноса электронов и дырок в диэлектрических пленках // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 10. С. 1099–1114.
11. Новиков Ю. Н., Гриценко В. А. Релаксация тока в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ : эксперимент и численное моделирование // ФТТ. 2017. Т. 59, вып. 1. С. 49–53.

12. **Xin Meng, Byun Y.-C., Kim H. S., et al.** Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride Thin Films: A Review of Recent Progress, Challenges, and Outlooks // *Materials*. 2016. N 9. Article ID 1007. 20 p.

13. **Kaloyeros A. E., Jove F. A., Jonathan Goff, et al.** Review-Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: Trends in Deposition Techniques and Related Applications // *ECS J. of Solid State Sci. and Techn.* 2017. Vol. 6. N. 10. P. P691—P714.

14. **Васильев В. Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 1. Термически активированные процессы в проточных реакторах // *Нано- и микросистемная техника*. 2018. Т. 20, № 5. С. 287—296.

15. **Васильев В. Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 2. Термически активированные процессы в реакторах циклического действия // *Нано- и микросистемная техника*. 2018. Т. 20, № 6. С. 329—339.

16. **Васильев В. Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 3. Плазмаактивированные процессы в проточных реакторах // *Нано- и микросистемная техника*. 2018. Т. 20, № 9. С. 542—554.

17. **Васильев В. Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 4. Процессы в проточных реакторах с активацией плазмой высокой плотности // *Нано- и микросистемная техника*. 2018. Т. 20, № 10. С. 585—595.

18. **Васильев В. Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 5. Плазмаактивированные процессы в реакторах циклического действия // *Нано- и микросистемная техника*. 2018. Т. 20, № 11. С. 659—675.

19. **Васильев В. Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 6. Каталитическое осаждение в проточных реакторах // *Нано- и микросистемная техника*. 2019. Т. 21, № 1. С. 3—13.

20. **Vasilyev V. Yu.** Thin Film Chemical Vapor Deposition in Integrated Circuit Technology: Equipment, Methodology and Thin Film Growth Experience. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014. 314 p.

21. **Applied Materials, Inc.** Applied Materials Launches new nitride deposition system for advanced transistor production.

URL: <http://www.appliedmaterials.com/company/news/press-releases/1999/07/applied-materials-launches-new-nitride-deposition-system-for-advanced-transistor-production>. (Дата обращения 06.07.2018).

22. **Gardeniers J. G. E., Tilmans H. A. C., Visser C. C. G.** LPCVD silicon-rich silicon nitride films for applications in micromechanics, studied with statistical experimental design // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1996. Vol. 14. N 5. P. 2879—2892.

23. **Temple-Boyer P., Rossi C., Saint-Etienne E., et al.** Residual stress in low pressure chemical vapor deposition SiN<sub>x</sub> films deposited from silane and ammonia // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1998. Vol. 16, N 4. P. 2003—2007.

24. **Zheng B., Zhou C., Wang Q., et al.** Deposition of Low Stress Silicon Nitride Thin Film and Its Application in Surface Micromachining Device Structures // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013. Vol. 2013. Article ID 835942. 4 p.

25. **Semmache B., Lemiti M., Chaneliere Ch., et al.** Silicon nitride and oxynitride deposition by RT-LPCVD // *Thin Solid Films*. Vol. 296, N 1—2. P. 32—36.

26. **Kotecki D. E., Chapple Sokol J. D.** Hydrogen incorporation in silicon nitride films deposited by remote electron cyclotron resonance chemical vapor deposition // *J. Appl. Phys.* 1995. Vol. 77, N 3. P. 1284—1293.

27. **Boehme C., Lucovsky G.** Dissociation reactions of hydrogen in remote plasma-enhanced chemical-vapor-deposition silicon nitride // *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2001. Vol. 19, N 5. P. 2622—2628.

28. **Goldbach H. D., Werf C. H.M., Löffler J., et al.** Hot-wire chemical vapor deposition of silicon nitride for multicrystalline silicon solar cells // *Conf. Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 2005. P. 1249—1252.

29. **Chow R., Lanford W. A., Wang K.-M., et al.** Hydrogen content of a variety of plasma-deposited silicon nitrides // *J. Appl. Phys.* 1982. Vol. 53, N 8. P. 5630—5633.

30. **Huang H., Winchester K. J., Suvorova A., et al.** Effect of deposition conditions on mechanical properties of low-temperature PECVD silicon nitride films // *Mat. Sci. and Eng. A*. 2006. Vol. 435—436. P. 453—459.

31. **Provine J., Schindler P., Kim Y., et al.** Correlation of film density and wet etch rate in hydrofluoric acid of plasma enhanced atomic layer deposited silicon nitride // *AIP Advances*. 2016. Vol. 6. N. 6. P. 065012—065021.

32. **Claasen W. A. P.** Ion Bombardment-Induced Mechanical Stress in Plasma-Enhanced Deposited Silicon Nitride and Oxynitride Films // *Plasma Chem. Plasma Proc.* 1987. Vol. 7, N 1. P. 109—124.

**V. Yu. Vasilyev**, D. Sci., Professor, [vasilev@corp.nstu.ru](mailto:vasilev@corp.nstu.ru)

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation,  
Deputy Director General, SibIS LLC, Novosibirsk, 630082, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Vasilyev Vladislav Yu.**, D. Sc., Professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Deputy Director General, SibIS LLC, Novosibirsk, 630082, Russian Federation, E-mail: [vasilev@corp.nstu.ru](mailto:vasilev@corp.nstu.ru)

## Silicon Nitride Thin Film Deposition for Microelectronics and Microsystems Technologies. Part 7. Summary on the Deposition Methods and Basic Film Features

Received on June 27, 2018

Accepted on July 20, 2018

*Part 7 presents comparative generalized data concerning the deposition temperature dependences of the deposition rates, the film composition and basic properties of the silicon nitride thin films (SNTF). Advantages and drawbacks of the deposition methods under review are presented in a graphic form. This allows us to compare visually the basic characteristics of the thin film deposition methods and the film properties, and to assess the applicability of these methods for obtaining of thin films and solving of the specific problems of the microelectronic and MEMS technologies. The presented generalizations of the film composition and the physical-chemical properties of SNTF can be used for analysis and solving of a wide range of technological problems.*

**Keywords:** silicon nitride, thin films, comparison of the deposition methods, integrated circuits, microelectromechanical systems

For citation:

**Vasilyev V. Yu.** Silicon Nitride Thin Film Deposition for Microelectronics and Microsystems Technologies.

Part 7. Summary on the Deposition Methods and Basic Film Features, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 131–142.

DOI: 10.17587/nmst.21.131-142

## Introduction

Silicon nitride was introduced in electronics in mid-1970s. This dielectric material attracted attention by the uniqueness of its properties and possibility of its obtaining in the form of thin films (TF), compatible with the technology of the silicon integrated circuits (IC), which made their first steps in the direction of integration. Already at the first stage of the research of the methods for obtaining of the silicon nitride thin films (SNTF) and properties of the material, the tasks of their obtaining were formulated both at high temperatures (for manufacturing of insulation and the transistor structures in ICs), and at low temperatures (for the finishing passivation of ICs) [1–3].

Obtaining of close by composition to the stoichiometric SNTF (S-SNTF, chemical formula —  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , ratio  $\text{Si}/\text{N} = 0.75$ ) was done at high temperatures by the method of chemical deposition from the gas phase (LPCVD) with participation of monosilane, silicon chlorides and ammonia. As a result, dichlorosilane ( $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ ) was selected as the basic industrial reagent. At a low-temperature plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) with participation of various silicon-containing substances (basically — monosilane), and also ammonia and nitrogen, the nonstoichiometric thin films containing silicon-nitrogen-hydrogen were received (hereinafter, SiNH-TF, the ratio of  $\text{Si}/\text{N}$  can differ essentially from  $\text{Si}/\text{N} = 0.75$  in both directions). Frequently, such films are also incorrectly called "silicon nitride".

Early in 1980s the first generalizations of the research works of SNTF appeared, out of which we can single out [4] and [5] as the most complete ones. A little bit later, a voluminous bibliographic compilation was published [6], which systematized the extensive literature on a wide range of questions connected with SNTF, and also [7]. Besides, in [6] the works on application of SNTF were generalized in the then considered promising IC technologies and other devices. As examples of the survey publications concerning the structure and electrophysical effects of an independent interest in SNTF it is possible to present [8–11]. From the recent works it is necessary to mention the survey publications [12, 13].

According to the author of the present review, all the publications considered the questions of obtaining of SNTF in an unacceptably brief way, which made it impossible to track the interrelations of those or other properties of SNTF with the conditions for their obtaining. Besides, in recent decades many original publications have not presented any data about the condi-

tions for obtaining of TF, which made those works not informative enough. In this connection the author considered the necessity for generalization and structurization of the accumulated information concerning the methods for obtaining of SNTF, their structure and basic properties. As a result, in [14–19] the author analyzed the conditions and directions for development of six basic technological methods for obtaining of SNTF applied in IC technologies and nano- and microelectromechanical systems (MEMS). At the depth of search of several decades the following methods were considered (which in the text below are designated, accordingly, by figures 1–6):

- Method 1 — in the flow reactors during the chemical vapor deposition from the gas phase (LPCVD) with the thermal activation [14];
- Method 2 — in the cyclic reactors during the thermally activated atomic-layer deposition (TA-ALD) [15];
- Method 3 — in the reactors of the flow type during the plasma-enhanced chemical deposition (PECVD) [16];
- Method 4 — in the flow type reactors during the plasma-enhanced chemical deposition with high-density plasma activation (HDP-CVD) [17];
- Method 5 — in the cyclic reactors during the plasma activation of ALD (PA-ALD) [18];
- Method 6 — in the flow reactors with the so-called "catalytic deposition" (Cat-CVD) [19], i.e. during a thermal reaction of the hydrides of silicon and nitrogen on a heated tungsten thread.

## Statement of problems of the review

In [20] a generalized approach was formulated to the description and analysis of the processes of obtaining of TF of various types with participation of the gas-phase reactions. The approach consisted in presentation of four basic dependences: "output" characteristics of the process of deposition on the "input" parameters of the processes (temperature, pressure, concentration of the reagents, etc.). Those major for the TF technology characteristics of the processes are the following:

- 1) Rate of deposition (rate of growth) of TF;
- 2) Composition of TF;
- 3) Physical and chemical properties of TF;
- 4) Electrical and electrophysical properties of TF.

The aim of the given part of the review is a systematization of the data [14–19] for the first three of the above characteristics in relation to various methods of deposition and types of SNTF. Such an analysis covers

the overwhelming majority of the technological applications of SNTF and is necessary for formation of a complete comparative view of the opportunities presented by various methods of SNTF deposition. The author would like to underline, that in the given work the electrical and electrophysical properties of SNTF are not considered (the fourth type of SNTF characteristic). The reason for it consists in essentially smaller volume of the publications concerning the limited methods for obtaining and specific use of TF, going beyond the framework of the given review. Certain data of this kind can be found, for example, in [10, 11].

In the present work, as the basic "input" parameter for the generalization of the resulting information on the deposition processes, the temperature of deposition of SNTF ( $T_d$ ) was selected. High-temperature LPCVD methods ( $T_d > \sim 700$  °C) allow us to obtain S-SNTF. At lower temperatures, depending on the obtaining method, the more or less nonstoichiometric SiNH-TFs are formed. However, also in the latter case, by manipulations with the composition of the gas mixes and conditions of deposition we can get SNTF, formally close by their composition to the stoichiometric ones. This occurs in case, if we take into account as the composition of the characteristic of only the ratio of Si/N = 0.75, however, as it is shown below, the correlation of Si/N is not an exhaustive characteristic of the composition of SiNH-TF.

During our analysis in the present work we considered the generalized values of the characteristics and parameters, the initial data of which can be found in parts 1–6 [14–19].

### Temperature dependences of the rates of deposition of SNTF

Fig. 1 presents the shaded in different ways the approximate values of the rates of deposition ( $W$ ) for methods 1–6 in case of the temperature intervals typical for them. These areas are rather reference ones, because within the shaded areas there are some variations of the rate of deposition. However, the convenience of such a presentation consists in the fact that by means of the shaded areas it is possible to present visually the possibilities of the methods for obtaining of SNTF, and also to pass to the generalizations concerning the composition and the basic properties of the films. Further in the work, the chosen types of the shaded areas for the considered methods of deposition 1–6 are preserved. To the data presented in fig.1 it is possible to add the following comments:

- The values of the rates of deposition for methods 1–6 differ more, than by four orders;
- Methods of TA-ALD 2 and the PA-ALD 5, realized, as a rule, in the cyclic reactors of individual type (that is, on one substrate), allow us to obtain films with extremely small rates of deposition, less than 0.1 nm/min [15, 18]. In this case the author believes, it is admissible

to use nm/min dimensionality instead of nm/cycle dimensionality typical for the ALD processes, because the duration of the cycles in both studied versions of ALD was equal to a minute and over. From the presented data it is visible that the ALD methods described in literature now are rather not suitable for use and demand a further research;

- The plasma-activated methods of PECVD (3) and HDP-CVD (4) and the catalytic method (6) in the flow reactors, more often of an individual type, allow us to receive very high rates of deposition;

- LPCVD high-temperature method (1) allows us to reach the intermediate values of the rates of deposition. However, due to its realization in the batch flow tubular reactors with a simultaneous load of about 100 substrates, a high efficiency of the process is achieved. The tubular high-temperature reactors with hot walls are applied in large quantities in manufacture of IC and MEMS for obtaining of S-SNTF during the use of SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>-NH<sub>3</sub> mixes.

A rare, but interesting for deposition at high temperatures from SiH<sub>4</sub>–NH<sub>3</sub> mixes, is the flow, hot-wall reactor of an individual type called SiNergy™ [21]. An advantage of such a reactor is essentially smaller cumulative thermal influences in comparison with the traditional LPCVD method in the tubular reactors. This is due to higher, up to 200 nm/min, rates of growth of the films because of the use by more than 2...2.5 orders higher working pressures (the rate of deposition, as a rule, is directly proportional to the pressure in the reactor). An advantage of the use of monosilane is also a lower defect density of the films due to absence of chlorine in the initial molecule. This eliminates the problem of formation of microparticles of the ammonium chloride (NH<sub>4</sub>Cl) and other chlorine-containing compositions in the gas phase and on the walls of the vacuum systems, pronounced for the silicon chlorides. The author would like to point out one more potential advantage of such a reactor. It is expected, that in such reactors due to variation of the correlation of the components in the gas phase it is possible to obtain high-temperature films with a homogeneous composition and silicon enriched content (SE-SNTF). According to data [22–24], such films are of interest for the use in MEMS technologies. As it was discussed in [14], obtaining of SE-SNTF in the tubular flow reactors during LPCVD is impossible in view of a big variation of the concentration of the components along the length of the working zone, which is eliminated in principle in the discussed individual reactor. Obtaining of very thin S-SNTF films for a rather narrow application is also possible by the method of a rapid thermal deposition (Rapid Thermal CVD, RT-CVD) from SiH<sub>4</sub>–NH<sub>3</sub> mixes [25]. Within the range of 700...850 °C the rates of growth in the reactors of individual type are equal to 50...300 nm/min, at that, the pressure in the reactor by an order exceeds the pressure in the "classical" tubular LPCVD reactors.

Giving brief characteristics to the processes of SNTF deposition, the author would like to point out, that for methods 1, 2, 5 the processes were described as proceeding in accordance with multi-route schemes with the limiting heterogeneous steps. In such processes the substrate surface is an active component of the reaction. At the same time, as a rule, the plasma-activated processes proceed in the gas phase without participation or with a minimal participation of the surface of the substrates. As a certain exception from this we can consider some PA-ALD processes, for which the plasma activation of one of the reaction components can increase the contribution of the surface reactions.

For the purpose of characterization and comparison of the kinetic features of the deposition processes, in [20] the author introduced a universal characteristic of the processes of deposition of TF (including the one applicable and for processes of obtaining of SNTF), dubbed as the effective constant of the rate of reaction  $k_{eff}$  with the dimensionality of a centimeter per second (cm/s) ( $k_{eff} \sim W/[C_{Si}]$ , where  $[C_{Si}]$  — concentration of the basic silicon-containing reagent in the gas phase, mol/l). High rates of deposition of the plasma- and catalyst-activated processes definitely correspond to the greater values of  $k_{eff}$ . At that, it is necessary to point out, that an increase of  $W$  (i.e.  $k_{eff}$ ) also directly correlates with the increase of the efficiency of the use of the reagents, which is shown by an arrow in the right part of fig. 1. However, an increase of  $W$  (i.e.  $k_{eff}$ ) has also a negative effect — it leads to a deterioration of the conformality of SNTF deposition on the developed reliefs of the devices. In the same fig. 1 an arrow points to the opposite direction in relation to the arrow of the efficiency of the use of the reagents. Thus, application of the high-speed processes is expedient for the substrates without a relief or with a minimally developed relief, while the low-speed processes allow us to receive essentially more conformal coatings [20]. An exception is the combined process of deposition with CVD and the simultaneous etching of TF, specially developed for obtaining of the conformal coatings on the high-aspect structures [17].

### Temperature dependences of SNTF composition

As the basic characteristics of SNTF composition the author selected the Si/N ratio and the concentration of hydrogen in a film. The latter characteristic is especially topical for the low-temperature deposition methods. We should point out, that for definition of Si/N relation the authors of the publications used various direct methods for definition of silicon and nitrogen (including the one with profiling of the elements by thickness of the films): Auger spectroscopy (AES); x-ray photoelectronic spectroscopy (XPS), secondary-ion mass spectrometry (SIMS); spectroscopy of the Rutherford backscattering (RBS), the method for detection of the recoil atoms (ERDA), etc., and for hydrogen

definition — SIMS, RBS, ERDA, the methods of nuclear reactions (NMR), and also the widespread preliminary calibrated infra-red spectroscopy with Fourier transform, allowing us to record the concentrations of Si-H and N-H bonds in SNTF.

The data in fig. 2, *a* point to a practically stoichiometric composition of the high-temperature films (S-SNTF, Si/N = 0.75), at only several atomic percent of the content of hydrogen (fig. 2, *b*). However, for the low-temperature plasma-activated SiNH-TF a very wide range of Si/N correlation with a certain general trend to enrichment by silicon is possible. Under certain conditions of the deposition processes (basically, during selection of the correlations of the silicon and nitric components of the reactions) and for SiNH-TF it appears possible to reach a formal stoichiometric correlation of Si/N = 0.75. However, it is impossible to consider such films as stoichiometric ones, because of a considerable presence of hydrogen in them (fig. 2, *b*), many times exceeding the content of hydrogen in the high-temperature S-SNTF (including those, received in the individual reactors [21, 25]). Out of the low-temperature ones, the comparative concentrations of hydrogen in SiNH-TF were observed for the films received by method 4 (HDP-CVD), where SiH<sub>4</sub>—N<sub>2</sub> mixes were usually applied. The maximal values of the content of hydrogen (up to 40 at. %) were recorded for the PECVD processes with the use of SiH<sub>4</sub>—NH<sub>3</sub> mixes. As a whole, the data presented in fig. 2, *b* correspond to the trend of a decrease of the concentration of hydrogen in SNTF in case of a rise of the temperature for obtaining of the films [5].

The author would like to underline, that in IC and MEMS technologies the thin films are often subjected to thermal annealing at high temperatures. In this case it is necessary to take into consideration information from the sources [26, 27] about removal of hydrogen from the films at temperatures approximately over 500...600 °C, which leads to a variation of the composition and structure of the films. According to the author, the problem of presence of hydrogen in SNTF is of interest for a separate publication.

As far as the presence of the other elements in SNTF is concerned, for example, chlorine, oxygen, carbon, here the following comments are necessary:

- In the high-temperature films presence of the impurity elements (residual elements from the initial reagents) is recorded at the level below the limit of detection of the methods of the analysis;
- In the low-temperature films obtained by ALD methods from the chlorine-derivative of monosilane [14, 18], the effects were observed of an abnormal high-speed dissolution of coatings and their oxidation in the air after their extraction from the reaction chambers. According to information of the work [5], during mixing of the chlorides of silicon and ammonia at low temperatures, formation was observed of

the soluble in water powder-like products: silicon diimide  $\text{Si}(\text{NH})_2$ , hexachlorodisilazane  $\text{Si}_2(\text{NH})\text{Cl}_6$ , etc. So, the composition and the structure of thus obtained coatings can be more complex than the regular SiNH-TF because of the presence of chlorine and the hydrogen-containing groups oxidizing easily in the air. However, according to [5], these products can transform into the silicon nitride at an essential rise of temperature of the process or annealing of TF.

The author would also like to comment on the active involvement by many authors of the values of the refraction index  $n$  for characterization of SNTF composition. The methods for definition of  $n$  are simple, hardware perfect, accurate and, as a consequence, widespread in IC and MEMS industry for control of TF compositions. However, with reference to SNTF it is necessary to point out the following. The refraction index for S-SNTF is usually accepted at the level of  $2.0 \pm 0.02$ , but in case of presence of the hydrogen and oxygen impurities in SNTF,  $n$  essentially decreases (down to 1.7...1.8), and in case of increase of Si/N correlation it raises considerably (for example, at  $\text{Si}/\text{N} = 1.42$  the value of  $n = 2.5$  [28]). Thus, during research of SNTF with the composition varying in a wide range the interpretation of the results by means of measuring of  $n$  can lead to erroneous conclusions.

### Temperature dependences of the basic physical and chemical properties of SNTF

In literature various physical and chemical characteristics of SNTF are discussed. Most authors frequently analyze the methodically simple and accessible to them rate of dissolution of SNTF in the solutions on the basis of hydrofluoric acid. According to different authors, the rates of dissolution demonstrate a trend to a decrease with the rise of the temperature of deposition of the films. Besides, an increase of the concentration of hydrogen results in higher rates of dissolution [29]. However, the problems are due to the fact that different authors have very different compositions of solvents, SNTF are obtained at various temperatures, etching is influenced strongly by the compositions of the films and conditions for etching, etc. Thus, a technologically convenient characteristic of SNTF can, in fact, be considered only as the secondary one, and this is of little use for the comparative analysis of the SNTF properties.

In this connection the author for a comparative analysis made his choice in favor of the primary characteristic of SNTF — film density ( $\gamma$ ), although this characteristic was investigated in a considerably smaller number of works. The value of density for S-SNTF is 2.9...3.1  $\text{g}/\text{cm}^3$  (fig. 3), which is actually close to the known reference value for a volume material — 3.17  $\text{g}/\text{cm}^3$ . The ranges of the density variation for the activated methods of deposition in fig. 3 show a trend to a decrease of the density of the low-temperature

SiNH-TF, which correlates with the trends for an increase of the concentration of hydrogen and enrichment with silicon (reference density of silicon — 2.33  $\text{g}/\text{cm}^3$ ). For latter case, for example, in [30] a direct dependence is shown of the decrease of  $\gamma$  in the range of 3.0...2.0 during a decrease of Si/N in the range of 0.75...0.5. Naturally, the rates of dissolution of SiNH-TF demonstrate an inverse dependency on the density of the films [31].

For MEMS technologies the most topical parameter of TF is the value of the mechanical stresses. By the results of generalizations [14—19], for SNTF the sign and the value of the mechanical stresses depend on numerous factors and in this connection this question demands a separate discussion going beyond the framework of the present work. The useful for comparisons reference ranges of the mechanical stresses ( $\sigma$ ) for various methods of obtaining of SNTF [14, 16—19] are presented in fig. 4. One can see that for S-SNTF the maximal values of the tensile, plus sign, mechanical stresses are typical. A version of a considerable decrease of the stress values for S-SNTF was demonstrated in [22, 23] by means of enrichment of a film with silicon and in the work [23] in 1.5 times by means of increasing the deposition temperature for  $\text{SiH}_4$ — $\text{NH}_3$  mixture. For the former case it is demonstrated by a block arrow in fig. 4 and the corresponding arrow in fig. 2,  $a$  for the level of variation of Si/N correlation.

On the contrary, for the activated processes in SiNH-TF, usually, a compressive (minus sign) type of stress is observed more likely. A comparison of the data in fig. 4 shows, that the greatest possibilities for variation of the sign and the values of the mechanical stresses are provided by method 3. For example, the results of the multifactorial experimental research works in [32] demonstrated, that the trend toward tensile stresses was observed at the rise of the deposition temperature and frequency of the plasma excitation and also at the rise of temperature of the thermal annealing, which followed the deposition.

### Conclusion

The state and directions for development of six basic methods for obtaining of SNTF for IC and MEMS applications were analyzed. Such methods are the deposition methods in the reactors of the flow and cyclic types during the thermal activation of the initial reagents, during the plasma activation, and also the method of the catalytic deposition with application of a decomposition of the initial reagents on a hot wire. A detailed analysis of the technologies for obtaining, specific features and directions for development of the concrete processes are presented in the corresponding parts [14—19]. The analysis comprised the basic publications for several decades of the research works and included specific features of the equipment, comparison of

the advantages and drawbacks of the applied chemical reagents, used parameters of the processes, etc.

The generalized comparative data presented in part 7 of the review in the form of the temperature areas for the rates of deposition, composition and basic properties of SNTF demonstrate the specific features of the analyzed methods of deposition. This makes possible not only a visual comparison of the basic characteristics of the deposition processes and TF parameters, but also an estimation of the applicability of the basic methods of obtaining of TF for solving of concrete tasks in the microelectronic and MEMS technologies.

## References

1. **Adams A. C.** Dielectric and Polysilicon Film Deposition, *In VLSI Technology*, 2<sup>nd</sup> edition. Edited by Sze S. M.: McGraw-Hill Int. Edition, 1988, pp. 233–271.
2. **Ting C. H.** Inorganic Dielectrics, *In Handbook of Multilevel Metallization for Integrated Circuits*. Eds. S. R. Wilson, C. J. Tracy, J. L. Freeman. Park Bridge, NJ., Noyes Publications, 1993, pp. 202–273.
3. **Cheng H. C.** Dielectric and Polysilicon Film Deposition, *In VLSI Technology*. Ed. by C. Y. Chang and S. M. Sze. McGraw-Hill Int. Edition, 1996, pp. 205–269.
4. **Morosanu C. E.** The Preparation, Characterization and Application of Silicon Nitride Films, *Thin Solid Films*, 1980, vol. 65, no. 1/2, pp. 171–208.
5. **Silicon nitride in Electronics**, Edited by Rzhanov A. V.: Elsevier Science Publishers B. V., 1988. 263 p.
6. **Gmelin Handbook of Inorganic and Organometallic Chemistry. Silicon Supplement Volume B 5c. Silicon Nitride in Microelectronics and Solar Cells / Edited by Pebler A.**: 8<sup>th</sup> Edition, Berlin Heidelberg GmbH, Springer-Verlag, 1991, 401 p.
7. **Andrievskiy R. A.** Nitrid kremniya — sintez i svoystva, *Uspehi himii*, 1995, vol. 64, no. 4, pp. 311–329 (in Russian).
8. **Gricenko V. A.** Elektronnaya struktura nitrida kremniya, *Uspehi fizicheskikh nauk*, 2012, vol. 182, no. 5, pp. 1–11 (in Russian).
9. **Gricenko V. A.** Amorfnaya struktura amorfnykh nestehiometricheskikh oksidov i nitridov kremniya, *Uspehi fizicheskikh nauk*, 2008, vol. 178, no. 7, pp. 727–737 (in Russian).
10. **Nasyrov K. A., Gricenko V. A.** Mehanizmy perenosa elektronov i dyrok k v dielektricheskikh plenках, *Uspehi fizicheskikh nauk*, 2013, vol. 183, no. 10, pp. 1099–1114 (in Russian).
11. **Novikov Yu. N., Gricenko V. A.** Relaksaciya toka v Si3N4: eksperiment i chislennoe modelirovanie, *FTT*, 2017, vol. 59, no. 1, pp. 49–53 (in Russian).
12. **Xin Meng, Byun Y.-C., Kim H. S., et al.** Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride Thin Films: A Review of Recent Progress, Challenges, and Outlooks, *Materials*, 2016, no. 9, article ID 1007, 20 p.
13. **Kaloyeros A. E., Jove F. A., Jonathan Goff, et al.** Review-Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: Trends in Deposition Techniques and Related Applications, *ECS J. of Solid State Sci. and Techn.*, 2017, vol. 6, no. 10, pp. P691–P714.
14. **Vasilyev V. Yu.** Tehnologii poluchenija tonkih plenok nitrida kremniya dlja mikroelektroniki i mikrosistemnoj tehniki. Chast 1. Termicheski aktivirovannye processy v protochnyh reaktorah, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 287–296 (in Russian).
15. **Vasilyev V. Yu.** Tehnologii poluchenija tonkih plenok nitrida kremniya dlja mikroelektroniki i mikrosistemnoj tehniki. Chast 2. Termicheski aktivirovannye processy v reaktorah ciklicheskogo dejstvija reaktorah, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 329–339 (in Russian).
16. **Vasilyev V. Yu.** Tehnologii poluchenija tonkih plenok nitrida kremniya dlja mikroelektroniki i mikrosistemnoj tehniki. Chast 3. Plazmoaktivirovannye processy v protochnyh reaktorah, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 9, pp. 542–554 (in Russian).
17. **Vasilyev V. Yu.** Tehnologii poluchenija tonkih plenok nitrida kremniya dlja mikroelektroniki i mikrosistemnoj tehniki. Chast 4. Processy v protochnyh reaktorah s aktivaciej plazmoj vysokoj plotnosti, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 10, pp. 585–595 (in Russian).
18. **Vasilyev V. Yu.** Tehnologii poluchenija tonkih plenok nitrida kremniya dlja mikroelektroniki i mikrosistemnoj tehniki. Chast 5. Plasma-aktivirovannye processy v reaktorah ciklicheskogo dejstvija, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 11, pp. 659–675 (in Russian).
19. **Vasilyev V. Yu.** Tehnologii poluchenija tonkih plenok nitrida kremniya dlja mikroelektroniki i mikrosistemnoj tehniki. Chast 6. Kataliticheskoe osazhdenie v protochnyh reaktorah, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 3–13 (in Russian).
20. **Vasilyev V. Yu.** Thin Film Chemical Vapor Deposition in Integrated Circuit Technology: Equipment, Methodology and Thin Film Growth Experience. New York. Nova Science Publishers, Inc.: 2014. 314 p.
21. **Applied Materials, Inc.** Applied Materials Launches new nitride deposition system for advanced transistor production. URL: <http://www.appliedmaterials.com/company/news/press-releases/1999/07/applied-materials-launches-new-nitride-deposition-system-for-advanced-transistor-production>.
22. **Gardeniers J. G. E., Tilmans H. A. C., Visser C. C. G.** LPCVD silicon-rich silicon nitride films for applications in micromechanics, studied with statistical experimental design, *J. Vac. Sci. Technol. A.*, 1996, vol. 14, no. 5, pp. 2879–2892.
23. **Temple-Boyer P., Rossi C., Saint-Etienne E., et al.** Residual stress in low pressure chemical vapor deposition SiN<sub>x</sub> films deposited from silane and ammonia // *J. Vac. Sci. Technol. A.*, 1998, vol. 16, no. 4, pp. 2003–2007.
24. **Zheng B., Zhou C., Wang Q., et al.** Deposition of Low Stress Silicon Nitride Thin Film and Its Application in Surface Micromachining Device Structures, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, vol. 2013, Article ID 835942. 4 pages.
25. **Semmache B., Lemiti M., Chaneliere Ch., et al.** Silicon nitride and oxynitride deposition by RT-LPCVD, *Thin Solid Films*, vol. 296, no. 1–2, pp. 32–36.
26. **Kotecki D. E., Chapple Sokol J. D.** Hydrogen incorporation in silicon nitride films deposited by remote electron cyclotron resonance chemical vapor deposition, *J. Appl. Phys.*, 1995, vol. 77, no. 3, pp. 1284–1293.
27. **Boehme C., Lucovsky G.** Dissociation reactions of hydrogen in remote plasma-enhanced chemical-vapor-deposition silicon nitride, *J. Vac. Sci. Technol. A.*, 2001, vol. 19, no. 5, pp. 2622–2628.
28. **Goldbach H. D., Werf C. H. M., Löffler J., et al.** Hot-wire chemical vapor deposition of silicon nitride for multicrystalline silicon solar cells, *Conf. Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2005, pp. 1249–1252.
29. **Chow R., Lanford W. A., Wang K.-M., et al.** Hydrogen content of a variety of plasma-deposited silicon nitrides, *J. Appl. Phys.*, 1982, vol. 53, no. 8, pp. 5630–5633.
30. **Huang H., Winchester K. J., Suvorova A., et al.** Effect of deposition conditions on mechanical properties of low-temperature PECVD silicon nitride films, *Mat. Sci. and Eng. A.*, 2006, vol. 435–436, pp. 453–459.
31. **Provine J., Schindler P., Kim Y., et al.** Correlation of film density and wet etch rate in hydrofluoric acid of plasma enhanced atomic layer deposited silicon nitride, *AIP Advances*, 2016, vol. 6, no. 6, pp. 065012–065021.
32. **Claesen W. A. P.** Ion Bombardment-Induced Mechanical Stress in Plasma-Enhanced Deposited Silicon Nitride and Oxynitride Films, *Plasma Chem. Plasma Proc.*, 1987, vol. 7, no. 1, pp. 109–124.



# МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 628.9.03

DOI:10.17587/nmst.21.143-153

**С. Г. Новиков**, канд. техн. наук, нач. лаб., e-mail: novikovsg@ulsu.ru,  
**А. С. Кадочкин**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., e-mail: a\_kadochkin@inbox.ru,  
**А. В. Беринцев**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: berints@mail.ru, **В. В. Светухин**, д-р физ.-мат. наук,  
вед. науч. сотр., e-mail: slava@sv.ulsu.ru, **А. С. Алексеев**, мл. науч. сотр., e-mail: granik@ya.ru  
Научно-исследовательский технологический институт им. С. П. Капицы УлГУ, г. Ульяновск

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ МИКРОЧАСТИЦ $^{63}\text{Ni}$ ДЛЯ РАДИОИЗОТОПНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ

Поступила в редакцию 09.10.2018

*Разработана конструкция радиоизотопного источника питания с использованием радиолюминесцентного источника света, который содержит гранулированный радиолюминофор, смешанный с частицами радиоизотопа  $^{63}\text{Ni}$ . Радиолюминофор и частицы радиоизотопа растворены в оптически-прозрачном компаунде, расположенном в виде слоя толщиной менее 100...150 мкм между фоточувствительными поверхностями полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей. В работе проведено моделирование, по результатам которого получены зависимости эффективности выхода радиационной энергии из микрочастиц изотопа  $^{63}\text{Ni}$  от размера частиц, эффективности люминесценции кристаллических радиолюминофоров на основе  $\text{ZnS:Cu}$  от размера кристаллов. Проведен расчет и оптимизация концентраций изотопа и радиолюминофора в радиолюминесцентной композиции по критерию максимального световыхода, выполнена оптимизация толщин радиолюминесцентных композиций в составе источников света. В результате моделирования установлено, что максимальный световыход обеспечивается композицией частиц радиолюминофора и радиоизотопа  $^{63}\text{Ni}$  со средним размером частиц около 3 мкм и при соотношении концентраций частиц радиолюминофора и радиоизотопа 0,1 %.*

**Ключевые слова:**  $^{63}\text{Ni}$ , радиолюминесценция, радиоизотопный источник питания

### Введение

Одной из актуальных научно-технических и технологических проблем является создание автономных необслуживаемых электрических и электромеханических систем для различных применений, способных функционировать длительное время. К числу таких систем можно отнести медицинские системы (кардио- и нейростимуляторы, биодатчики и аналитические системы на "чипе", системы жизнеобеспечения), устройства микро- и нанoeлектроники (МЭМС и НЭМС, автономные электронные системы с совмещенным питанием, микропроцессорные системы с низким энергопотреблением, энергонезависимая память), информационные системы (автономные системы шифрования, радиочастотные активные и пассивные метки) и т. д. Перспективность применения подобных устройств связана с решением вопроса о создании качествен-

ного автономного источника электрического питания длительного срока службы. Современные электрохимические батареи, аккумуляторы и ионисторы не применимы для таких устройств, так как не могут обеспечить длительный срок службы, а также не способны работать в экстремальных климатических условиях. Практически единственным методом создания источников такого типа является использование энергии альфа- или бетараспада [1] долгоживущих радиоизотопов посредством прямого или двойного преобразования [2] в электрическую энергию.

В роли источников ионизирующего излучения при создании источников электрического питания могут выступать различные изотопы [3], однако, если в качестве критериев отбора указать период полураспада более 20 лет, значения энергии частиц, не превышающие пороговые значения энергии, при которых наблюдается деградация полупроводника

меньше 200 кэВ, а также отсутствие гамма-составляющих, то практически единственным изотопом, удовлетворяющим заданным параметрам, является  $^{63}\text{Ni}$  ( $T_{1/2} = 100,1$  год,  $E_{\text{ср}} = 17$  кэВ [3, 4]).

### Бетавольтаические источники питания с использованием пленочных радиационных источников на базе $^{63}\text{Ni}$

В большинстве конструкций источник ионизирующего излучения в составе источника электрической энергии является твердотельным — тонкой пленкой ( $^{63}\text{Ni}$ , тритиды).

Основной проблемой, возникающей при использовании источников бета-излучения, в частности на основе  $^{63}\text{Ni}$ , является самопоглощение электронов в материале источника.

Наличие самопоглощения приводит к тому, что лишь небольшая часть бета-частиц выходит из плоского источника и может быть использована для преобразования в световую или электрическую энергию.

Поверхностную активность плоского источника на основе  $^{63}\text{Ni}$  можно рассчитать. Расчеты проводят в предположении, что источник состоит из множества точечных источников, поток частиц от которых уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния. В расчетах учтен экспоненциальный характер поглощения излучения с расстоянием. Поверхностная активность формируется путем интегрирования потоков частиц, создаваемых точечными источниками. В результате можно получить зависимость поверхностной активности (Ки/см<sup>2</sup>) плоского источника от его толщины [2]:

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{A_m}{2\mu_m} \int_0^1 z \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\mu_m d D_L}{z}\right) \right] dz, \quad (1)$$

где  $D_L$  — толщина источника;  $d$  — плотность никеля (8,9 г/см<sup>3</sup>);  $A_m$  — удельная активность  $^{63}\text{Ni}$  (13,8 Ки/г при 24 %-ном обогащении). Коэффициент поглощения  $\mu_m$  связан с максимальной энергией бета-частиц с помощью следующего эмпирического соотношения [5]:  $\mu_m = 15,5 \cdot \varepsilon_{\text{max}}^{-1,41}$ , где  $\varepsilon_{\text{max}} = 67$  кэВ максимальная энергия бета-частиц для  $^{63}\text{Ni}$ .

Также можно оценить и долю бета-частиц, достигших поверхности пленки:

$$\eta_{\text{пл}} = \frac{1}{\mu_m d D_L} \int_0^1 z \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\mu_m d D_L}{z}\right) \right] dz. \quad (2)$$

На рис. 1 представлена зависимость поверхностной активности (для 24 %-ного обогащения по  $^{63}\text{Ni}$ ), рассчитанная по выражению (1), от толщины пленки. Из рис. 1 видно, что увеличение толщины

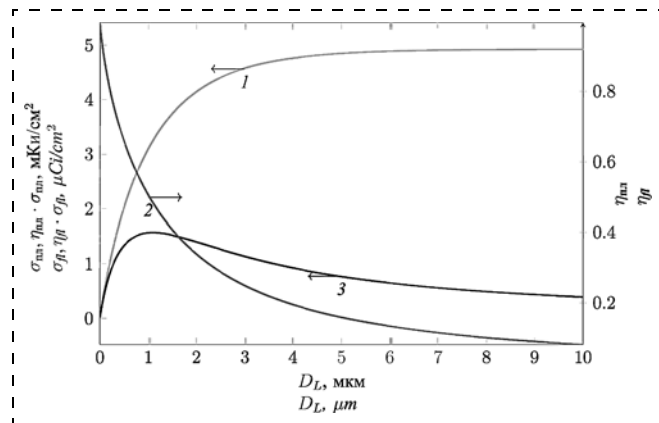


Рис. 1. Зависимости поверхностной активности пленки (кривая 1), доли бета-частиц, достигших поверхности пленки (кривая 2), эффективности переноса энергии бета-электронами (кривая 3) от толщины пленки  $^{63}\text{Ni}$

Fig. 1. Dependences of the surface activity of the film (curve 1), the proportion of beta particles reached the surface of the film (curve 2), the efficiency of energy transfer by beta electrons (curve 3) on the film thickness  $^{63}\text{Ni}$

пленки свыше 5 мкм не приводит к увеличению поверхностной активности. Кривая 2 представляет собой долю бета-частиц, достигших поверхности пленки. Кривая 3 эффективности использования бета-частиц, возникших в результате радиоактивного распада, построена как произведение зависимостей, представленных кривыми 1 и 2.

Кроме того, твердотельным источникам присущ еще ряд недостатков, а именно:

- при ограниченной площади поверхности преобразователей используются малые массы изотопов (единицы микрограммов);
- методы увеличения поверхности источника (профилирование с размерами в единицы микрометров) не развиты;
- технология производства источников непосредственно на поверхности преобразователя — отдельная, нерешенная на данном этапе научно-техническая задача;
- работа с открытыми источниками требует специальных условий.

Таким образом, возникает ряд научных и технических задач, связанных с преодолением указанных недостатков и достижением максимальной эффективности при использовании твердотельных источников ионизирующего излучения, в частности на основе  $^{63}\text{Ni}$ .

В применении полупроводниковых бета-преобразователей для радиоизотопных источников электрического питания также существуют нерешенные проблемы: у всех известных прямых бета-преобразователей низкий КПД < 5 %; дорогая технология производства структур с развитой поверхностью; низкая радиационная стойкость полупроводниковых структур, особенно наноструктур;

низкие напряжения (порядка ширины запрещенной зоны) и малые токи (порядка единиц наноампер).

При этом в науке и технике существует целое направление, связанное с преобразованием световой энергии в электрическую — *фотовольтаика* [6].

В этом направлении достигнуты рекордные КПД у преобразователей, оптимизированы конструкции, разработаны новые материалы. На протяжении последних 20 лет развитие этого направления обеспечено решением многих научных, технических и технологических проблем, что может быть существенным заделом для решения задач создания эффективных радиоизотопных батарей. Перспективной в данных условиях представляется идея двойного преобразования энергии распада в электрическую энергию [2].

### Конструкция радиоизотопного источника питания с двойным преобразованием энергии на базе $^{63}\text{Ni}$

Анализ показывает, что в источниках с двойным преобразованием (энергия распада — свет — электрическая энергия) возможно достижения значительных КПД, в частности, более 10 %, за счет использования преобразования энергии распада — свет с КПД до 50 % и преобразования световой энергии — электрическая энергия с КПД до 35 %. Для реализации таких источников можно использовать закрытый безопасный радиолюминесцентный источник света на основе  $^{63}\text{Ni}$  и радиолюминофоров различных цветов свечения [7] и спектрально согласованный полупроводниковый фотопреобразователь на основе полупроводниковых гетероструктур с высоким КПД. В результате чего возможно: упрощение технологии производства таких источников; модификация источника питания (в зависимости от размеров радиолюминесцентного источника; наращивание мощности за счет стековой архитектуры (параллельное и последовательное включение одинаковых базовых элементов); использование эффективных компонентов (радиационно-стимулированных источников света и фотопреобразователей) сторонних производителей; повышение функциональности за счет изменения формы и геометрии источника; возможность реализации функций накопления энергии.

При создании изотопных источников электрической энергии на основе двойного преобразования возможно существенное повышение эффективности использования энергии радиоактивного распада в световую за счет создания оптимальных микроструктурированных радиолюминесцентных композиций на основе люминофора и микрочастиц изотопов [8]. При этом возможна активация и легирование люминофоров изотопами никеля.

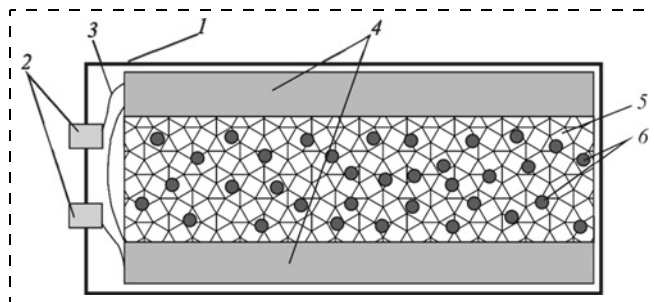


Рис. 2. Радиоизотопный источник электрического питания длительного срока действия: 1 — корпус; 2 — электрические контакты; 3 — электрические провода; 4 — фотоэлектрические преобразователи; 5 — гранулированный радиолюминофор; 6 — частицы радиоизотопа  $^{63}\text{Ni}$

Fig. 2. Radioisotope power source of long life: 1 — package; 2 — electric contacts; 3 — electric contacts; 4 — photoelectric converters; 5 — granulated radiophosphor; 6 — particles of the  $^{63}\text{Ni}$  radioisotope

Предлагаемый радиоизотопный источник электрического питания длительного срока действия [9] (рис. 2) содержит корпус 1, снабженный внешними электрическими контактами 2, соединенными посредством электрических проводов 3 с внешними электрическими контактами двух полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей 4, между которыми расположен радиолюминесцентный источник оптического излучения. Этот источник света представляет собой гранулированный радиолюминофор 5, смешанный с частицами радиоизотопа  $^{63}\text{Ni}$  6, которые растворены в оптически прозрачном компаунде, расположенном в виде слоя между fotocувствительными поверхностями полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей 4 со спектральным диапазоном поглощения, согласованным со спектральным диапазоном оптического излучения радиолюминофора.

Получение микрочастиц  $^{63}\text{Ni}$  возможно различными методами, например, лазерной абляцией металлического никеля в жидкости с помощью мощного фемтосекундного лазера.

Принцип работы такого источника питания следующий. При радиоактивном бета-распаде изотопа  $^{63}\text{Ni}$  испускаются электроны со средней энергией 17 кэВ. Взаимодействие испускаемых электронов с частицами радиолюминофора, в качестве которого может использоваться, например, полупроводниковое соединение ZnS, легированное Cu, Ag, Mn и другими химическими элементами, вызывает радиолюминесценцию (свечение), цвет которой зависит от легирующего элемента, а интенсивность от числа электронов, взаимодействующих с радиолюминофором. Фотоны, возникающие при радиолюминесценции, выходя из радиолюминофора, попадают на чувствительные поверхности фотопреобразователей, работающих в фотовольтаическом режиме. В результате на выходных электрических контактах фотопреобразователя при ус-

ловии неизменности интенсивности свечения радиолюминесцентного источника света образуется постоянное фотонапряжение.

В качестве радиолюминофоров могут выступать, например, полупроводниковые соединения  $A^{II}B^{VI}$ , легированные  $^{63}\text{Ni}$ , что обеспечит еще большую эффективность радиолюминофора за счет расположения источника ионизирующего излучения внутри частиц радиолюминофора. Кроме того, использование в качестве активатора  $^{63}\text{Ni}$  позволит расширить спектр свечения люминофора, что важно для применений совместно с фотопреобразователями с широким спектральным диапазоном.

Для расширения спектрального диапазона свечения радиолюминесцентного источника света при совместном использовании с широкодиапазонным фотопреобразователем в предлагаемом источнике возможно применение смеси порошков радиолюминофоров с разными цветами свечения, активированных различными химическими элементами. Это позволяет получить источник света с несколькими спектральными полосами излучения. Такая комбинация позволит более эффективно использовать фотопреобразователь с широким спектральным диапазоном.

Для снижения себестоимости производства такого источника вместо частиц металлического  $^{63}\text{Ni}$  возможно использование частиц  $^{63}\text{NiCl}_2$ . Таким образом исключается дорогостоящая процедура выделения металлического никеля из раствора  $^{63}\text{NiCl}_2$ , что приводит к снижению стоимости радиоизотопного источника и источника питания в целом.

В предлагаемой конструкции радиолюминесцентный источник оптического излучения выполнен в виде плоской герметичной стеклянной колбы, находящейся между фоточувствительными поверхностями полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей. Этот вариант обеспечивает радиационную безопасность радиолюминесцентного источника оптического излучения, поскольку поглощение бета-электронов, не участвующих в процессе радиолюминесценции, от частиц, находящихся на поверхности радиолюминесцентной композиции или близко к ней, полностью происходит в 100 мкм стекла. Выход бета-частиц за пределы радиолюминесцентного источника света исключен.

### Расчет оптимального значения диаметра частицы $^{63}\text{Ni}$

В предлагаемом радиоизотопном источнике света решается задача максимального использования энергии радиоактивного распада радиоизотопа  $^{63}\text{Ni}$  для преобразования в оптическую энергию. Для этого радиоизотоп выполняется в виде частиц

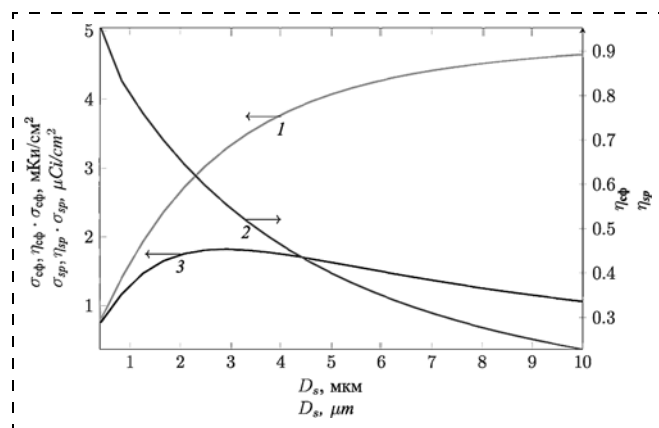


Рис. 3. Зависимости поверхностной активности сферической никелевой частицы (кривая 1), доли бета-частиц, достигших поверхности сферической частицы (кривая 2), эффективности переноса энергии бета-электронами (кривая 3) от диаметра частицы  $^{63}\text{Ni}$

Fig. 3. Dependencies of the surface activity of the spherical nickel particle (curve 1), the proportion of beta particles reached the surface of the spherical particle (curve 2), and the efficiency of energy transfer by beta electrons (curve 3) depending on the  $^{63}\text{Ni}$  particle diameter

со средним размером менее 3 мкм. Выбор размера частиц связан с устранением эффекта самопоглощения энергии в объеме радиоизотопа  $^{63}\text{Ni}$ .

На рис. 3 (кривая 1) приведена зависимость поверхностной активности сферической никелевой частицы от ее диаметра, рассчитанная по следующей формуле [2]:

$$\sigma_{\text{сф}} = \frac{A_m}{4\mu_m} \left\{ 1 + \frac{2}{(\mu_m d)^2 (D_s)^2} [(1 + \mu_m d D_s) \times \exp(-\mu_m d D_s) - 1] \right\}, \quad (3)$$

где  $D_s$  — диаметр сферы.

При размерах частицы более 10 мкм ее поверхностная активность практически не изменяется. Это происходит вследствие поглощения бета-частиц в материале никелевой частицы. Таким образом, использование частиц диаметром более 10 мкм нецелесообразно. Кривая 2 на рис. 3 характеризует зависимость доли бета-частиц, возникших внутри сферической частицы и достигших ее поверхности, от диаметра частицы  $^{63}\text{Ni}$ .

Доля бета-частиц, достигших поверхности сферической частицы, определяется выражением

$$\eta_{\text{сф}} = \frac{6}{4\mu_m d D_s} \left\{ 1 + \frac{2}{(\mu_m d)^2 (D_s)^2} \times [(1 + \mu_m d D_s) \exp(-\mu_m d D_s) - 1] \right\}. \quad (4)$$

Здесь же (рис. 3 кривая 3) представлена эффективность использования бета-частиц, возникших в

результате радиоактивного распада, определяемая как произведение зависимостей, представленных кривыми 1 и 2. Как следует из рис. 3 (кривая 3), оптимальным оказывается диаметр частицы около 3 мкм. В этом случае обеспечивается наиболее эффективное использование дорогостоящего  $^{63}\text{Ni}$ .

### Расчет интенсивности света, излучаемого композитом

Для повышения эффективности преобразования энергии, вышедшей из частицы радиоизотопа, в источнике используется порошок радиолюминофора со средним размером частиц менее 3 мкм. Указанные размеры позволяют плотно окружить частицу радиоизотопа одним или несколькими слоями радиолюминофора, что обеспечит попадание практически всех электронов из радиоизотопа в радиолюминофор и максимально эффективное преобразование их энергии в энергию фотонов. Максимальный эффект достигается при концентрации радиоизотопа в композите, равной 0,1 % (рис. 4). Дальнейшее увеличение концентрации никелевых частиц в композите люминофор—никель не приводит к увеличению интенсивности света ввиду поглощения оптического излучения в композите.

Интенсивность света, излучаемого композитом толщины  $L$ , составленным из малых сферических частиц никеля, равномерно перемешанных с люминофором, определяется выражением:

$$I = \frac{k\eta_{\beta}S}{\alpha} (1 - e^{-\alpha L}), \quad (5)$$

где  $\alpha$  — коэффициент поглощения;  $\eta_{\beta}$  — концентрация  $\beta$ -частиц;  $S$  — площадь поверхности образ-

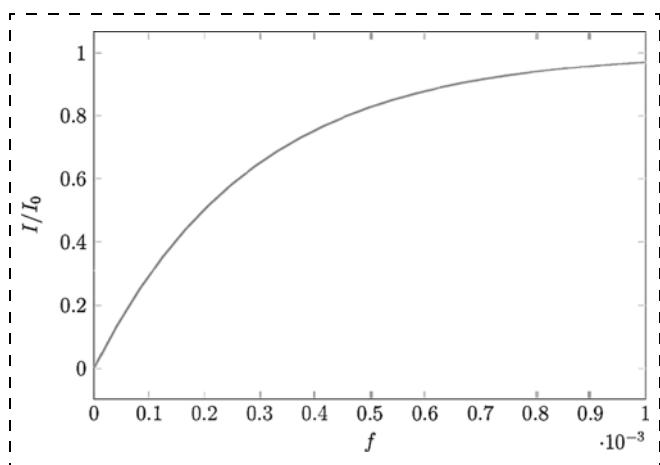


Рис. 4. Зависимость интенсивности люминесценции от объемной доли частиц  $^{63}\text{Ni}$  в композите люминофор—никель

Fig. 4. Dependence of the luminescence intensity on the volume fraction of  $^{63}\text{Ni}$  particles in the radiophosphor-nickel composite

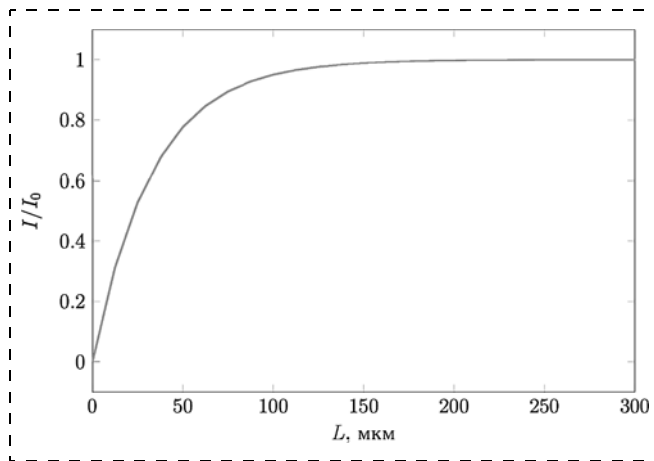


Рис. 5. Зависимость интенсивности излучения от толщины слоя композита люминофор—никель

Fig. 5. Dependence of radiation intensity on the thickness of the radiophosphor-nickel composite layer

ца;  $k$  — квантовый выход. Концентрация  $\beta$ -частиц и коэффициент поглощения пропорциональны объемной доле  $f$  никелевых частиц в композите:

$$\eta_{\beta} = a_1 f, \quad \alpha = a_2 f. \quad (6)$$

Тогда

$$I = \frac{k a_1 S}{a_2} (1 - e^{-a_2 f L}). \quad (7)$$

Из (7) видно, что интенсивность света, излучаемого самосветящимся композитом, испытывает насыщение. Для интенсивности, равной  $I = 0,95 I_{\text{max}} = 0,95 (k a_1 S / a_2)$ , показатель экспоненты  $a_2 f L = 3$ , коэффициент  $a_2$  при небольших факторах заполнения  $f$ , как показывает расчет, оказывается равным  $2,3 \cdot 10^5$  см. Таким образом, насыщение интенсивности наступает при значении произведения  $fL$ , равном  $1,3 \cdot 10^{-5}$  см. Дальнейшее увеличение толщины композита или концентрации никелевых частиц в нем не приводит к увеличению интенсивности излучения. Таким образом, если положить произведение  $fL$ , равным  $1,3 \cdot 10^{-6}$  см (в 10 раз меньше насыщающего, при этом  $I = 0,25 I_{\text{max}}$ ), и если принять, что объемная доля частиц никеля  $f$  равна 0,001, то толщина композита составит 13 мкм.

В качестве связующего материала в радиолюминесцентном источнике может использоваться оптически прозрачный компаунд, который несколько снижает эффективность преобразования за счет поглощения части энергии электронов. При этом толщина радиолюминесцентного источника света выбирается в пределах 100...150 мкм, что обеспечивает максимальный выход света из источника и малые боковые потери. Зависимость интенсивности света, излучаемого люминофором от его толщины, определяется формулой (5) и представлена

на рис. 5. Из рис. 5 видно, что зависимость интенсивности от толщины испытывает насыщение и увеличение толщины светоизлучающего композита свыше 100...150 мкм не приводит к увеличению интенсивности излучаемого света.

### Сравнительный расчет эффективностей выхода радиационной энергии для источников в виде сферических частиц и плоских источников на базе $^{63}\text{Ni}$

Если эффективность испускания  $\beta$ -электронов сферическими частицами диаметром порядка 0,5 мкм выше в 5 раз (рис. 6), тогда эквивалентный по активности объем частиц  $V_{\text{Ni}}$  составит  $5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3$ . Поскольку объемная доля частиц никеля в композите определяется выражением

$$f = \frac{V_{\text{Ni}}}{V} = \frac{V_{\text{Ni}}}{SL}, \quad (8)$$

где  $S$  — площадь образца, тогда

$$fL = \frac{V_{\text{Ni}}}{S}. \quad (9)$$

Чтобы обеспечить выполнение условия  $fL = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ , площадь образца должна составить  $38 \text{ см}^2$ .

При этом суммарная поверхностная активность сферических источников диаметром 0,1...1 мкм в 4—5 раз больше активности плоского источника толщиной 3 мкм такого же объема. Этот эффект будет более заметным, если толщина плоского источника больше 3 мкм.

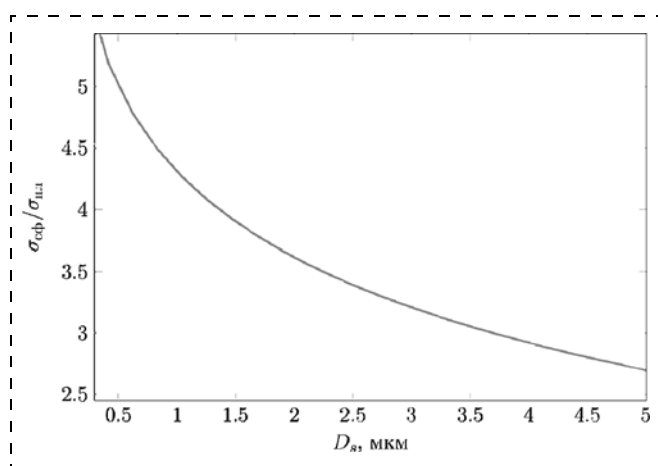


Рис. 6. Зависимость отношения поверхностной активности сферической частицы и поверхностной активности пленки толщиной 3 мкм от диаметра частицы

Fig. 6. Dependence of the ratio of the surface activity of the spherical particle and the surface activity of the film of 3  $\mu\text{m}$  thick on the particle diameter

В качестве референсного пленочного источника выбран источник, содержащий пленку  $^{63}\text{Ni}$  толщиной 3 мкм и площадью  $1 \text{ см}^2$ . Толщина пленочного источника определена из условия насыщения потока  $\beta$ -частиц. Такая пленка содержит объем  $^{63}\text{Ni}$ , равный  $3 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3$ .

### Заключение

Разработана конструкция радиоизотопного источника питания с использованием радиолюминесцентного источника света, который содержит гранулированный радиолюминофор, смешанный с частицами радиоизотопа  $^{63}\text{Ni}$  со средним размером менее 3 мкм и содержанием более 0,1 %. Радиолюминофор и частицы радиоизотопа растворены в оптически-прозрачном компаунде, расположенном в виде слоя толщиной менее 100...150 мкм между фоточувствительными поверхностями полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей. Спектр чувствительности фотопреобразователей при этом согласован со спектром оптического излучения радиолюминофора. Предложенная конструкция является более эффективным решением в сравнении с конструкциями радиационно-стимулированных источников питания на основе пленочных источников ионизирующего излучения и полупроводниковых преобразователей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 16-48-730330\_p\_a.

### Список литературы

1. Magil J., Galy J. Radioactivity Radionuclides Radiation. Berlin: Springer, 2005. 259 p.
2. Bower K. E., Barbanel Y. A., Shreter Y. G., Bohnert G. W. Polymers, Phosphors, and Voltaics for Radioisotope Microbatteries. Abingdon: CRC Press, 2002. 504 p.
3. Prelas M. A., Weaver C. L., Watermann M. L. et al. A review of nuclear batteries // Progress in Nuclear Energy. 2014. Vol. 75. P. 117—148.
4. Friedlander G., Macias E. S., Kennedy J. W. Nuclear and Radiochemistry. Wiley, 1981. 704 p.
5. Yao S., Song Z., Wang X. et al. Design and simulation of betavoltaic battery using large-grain polysilicon // Applied Radiation and Isotopes. 2012. Vol. 70, N. 10. P. 2388—2394.
6. Luque A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Wiley, 2003. 1138 p.
7. Михальченко Г. А. Радиолюминесцентные излучатели. М.: Атомиздат, 1988. 152 с.
8. Clothier B. A., Nielsen M. C., Tolliver T. R. et al. Pat. 20110100439, RADIOISOTOPE POWER SOURCE; publ. May. 2011.
9. Новиков С. Г., Беринцев А. В., Алексеев А. С. и др. Радиоизотопный источник электрического питания. Пат. 169881 RU.; заявл. 26.06.2016; опубл. 05.04.2017.

S. G. Novikov, Head of Laboratory of Solid State Electronics, novikovsg@ulsu.ru,  
A. S. Kadochkin, Senior Researcher, a\_kadochkin@inbox.ru, A. V. Berintsev, Senior Researcher, berints@mail.ru,  
V. V. Svetukhin, Leading Researcher slava@sv.ulsu.ru, A. S. Alekseyev, Junior Researcher, granik@ya.ru,  
Kapitsa Scientific-Research Institute of Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russian Federation

*Corresponding author:*

Novikov Sergey G., Head of Laboratory of Solid State Electronics, Kapitsa Scientific-Research Institute of Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russian Federation

## Simulating of Radioluminescent Compositions Based on Microparticles of $^{63}\text{Ni}$ for Radioisotope Power Sources

Received on September 10, 2018

Accepted on November 22, 2018

The design of a radioisotope power source using a radioluminescent light source, which contains a granulated radiophosphor mixed with microparticles of the  $^{63}\text{Ni}$  radioisotope, has been developed. Phosphor and particles of a radioisotope are dissolved in an optically transparent compound located in the form of a layer with a thickness of less than 100–150  $\mu\text{m}$  between the photosensitive surfaces of semiconductor photoelectric converters. In this work, a simulation was carried out, according to the results of which the dependences of the efficiency of radiation energy from microparticles of the  $^{63}\text{Ni}$  isotope on the particle size and the luminescence efficiency of ZnS:Cu-based crystalline phosphor on the crystal size were obtained.

Calculations and optimization of the concentrations of the radioisotope and phosphor in the radioluminescent composition according to the criterion of maximum light output and optimization of the thicknesses of the radioluminescent compositions under conditions of light sources were fulfilled. As a result of the simulation, it was established that the maximum light output is provided by the composition of particles of a phosphor and a  $^{63}\text{Ni}$  radioisotope with an average particle size of about 3 microns and with a ratio of the concentrations of particles of a phosphor and a radioisotope of 0.1 %.

**Keywords:**  $^{63}\text{Ni}$ , nuclear battery, radioisotope power source, radioluminescent light source

*For citation:*

Novikov S. G., Kadochkin A. S., Berintsev A. V., Svetukhin V. V., Alekseyev A. S. Simulating of Radioluminescent Compositions based on Microparticles of  $^{63}\text{Ni}$  for Radioisotope Power Sources, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 143–153.

DOI: 10.17587/nmst.21.143-153

### Introduction

One of the issues is the creation of autonomous unattended electrical and electromechanical systems for various applications capable of functioning for a long time. Such systems include medical systems (cardio- and neurostimulators, biosensors and analytical systems on a chip, life support systems), micro- and nanoelectronics devices (MEMS and NEMS, autonomous electronic systems with combined power, low-power microprocessor systems, non-volatile memory), information systems (autonomous encryption systems, radio-frequency active and passive tags), etc. The prospects of use of such devices is related to the question of creating of high-quality long-life autonomous power supply unit. Modern electrochemical batteries, rechargeable batteries and ionistors are not applicable for such devices, since they cannot provide a long service life and are also unable to work in extreme climatic conditions. Practically the only way to create sources is to use the energy of alpha or beta decay [1] of long-lived radioisotopes by direct or double conversion [2] into electrical energy.

In the role of ionizing radiation sources at creating of electric power sources can act various isotopes [3], however, if the half-life period is more than 20 years as the selection criteria, the particle energy values not exceeding the threshold energy values at which the semiconductor degradation is less than 200 keV, as well as the absence of gamma components, then practically the only isotope that satisfies the given parameters is  $^{63}\text{Ni}$  ( $T_{1/2} = 100$ , 1 year,  $E_{av} = 17$  keV [3, 4]).

### Betavoltaic power sources using $^{63}\text{Ni}$ film-based radiation sources

In most structures, the source of ionizing radiation in the composition of the source of electrical energy is a solid-state — a thin film ( $^{63}\text{Ni}$ , tritides).

The main issue arising from the use of beta-radiation sources, in particular, based on  $^{63}\text{Ni}$ , is the self-absorption of electrons in the source material.

The presence of self-absorption leads to the fact that only a small part of the beta particles comes from a flat

source and can be used to convert to light or electrical energy.

The surface activity of the  $^{63}\text{Ni}$ -based flat source can be calculated. The calculations are performed under the assumption that the source consists of a set of point sources, the particle flux from which decreases inversely proportional to the square of the distance. The calculations take into account the exponential nature of radiation absorption with distance. Surface activity is formed by integrating the particle fluxes generated by point sources. As a result, it is possible to obtain the dependence of the surface activity ( $\text{Cu}/\text{cm}^2$ ) of a flat source on its thickness [2]:

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{A_m}{2\mu_m} \int_0^1 z \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{\mu_m d D_L}{z}\right) \right] dz, \quad (1)$$

where  $D_L$  is the source thickness,  $d$  is the density of nickel ( $8.9 \text{ g}/\text{cm}^3$ ),  $A_m$  is the specific activity of  $^{63}\text{Ni}$  ( $13.8 \text{ Cu}/\text{g}$  at 24 % enrichment). The absorption coefficient  $\mu_m$  is related to the maximum energy of beta particles using the following empirical relation [5]:  $\mu_m = 15,5 \cdot \varepsilon_{\text{max}}^{-1,41}$ , where  $\varepsilon_{\text{max}} = 67 \text{ keV}$  is the maximum energy of beta particles for  $^{63}\text{Ni}$ .

You can also estimate the proportion of beta particles that have reached the surface of the film:

$$\eta_{\text{пл}} = \frac{1}{\mu_m d D_L} \int_0^1 z \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{\mu_m d D_L}{z}\right) \right] dz. \quad (2)$$

Fig. 1 shows the dependence of surface activity (for 24 % enrichment on  $^{63}\text{Ni}$ ), calculated by expression (1), on the film thickness. Fig. 1 shows that increasing the film thickness over  $5 \mu\text{m}$  does not lead to an increase in surface activity. Curve 2 is the fraction of beta particles that have reached the surface of the film. Curve 3 of the efficiency of using beta particles resulting from radioactive decay is constructed as a product of the dependences represented by curves 1 and 2.

In addition, a number of drawbacks are inherent to the solid-state sources, namely:

- small isotopic masses (microgram units) are used with a limited surface area of the converters;
- methods for enlarging the surface of the source (profiling with dimensions in units of  $\mu\text{m}$ ) are not developed;
- technology of production of sources directly on the surface of the converter is a special scientific and technical problem unsolved at this stage;
- work with open sources requires special conditions.

Thus, a number of scientific and technical problems arise in overcoming these drawbacks and achieving maximum efficiency when using solid-state sources of ionizing radiation, in particular, based on  $^{63}\text{Ni}$ .

There are also unsolved issues in the use of semiconductor beta-converters for radioisotope sources of

electrical power: all known direct beta-converters have a low efficiency of  $< 5 \%$ ; "expensive" technology for production of the structures with a developed surface; low radiation resistance of semiconductor structures, especially nanostructures; low voltages (about the width of the forbidden zone) and low currents (of the order of nA units).

At the same time in science and technology there is a whole direction associated with the conversion of light energy into electrical energy — photovoltaics [6].

In this direction, the record-breaking efficiency of converters was achieved, designs were optimized, novel materials were developed. Over the past 20 years, the development of this area has been provided by the solution of many scientific, technical and technological problems, which may be a significant basis for solving the problems of creating efficient radioisotope batteries. The idea of double conversion of decay energy into electric energy [2] seems promising under these conditions.

### The design of the radioisotope power source with double power conversion based on $^{63}\text{Ni}$

The analysis shows that significant efficiencies can be achieved in sources with double energy conversion (decay energy — light energy — electric energy), in particular more than 10 %, due to the use of transformation energy decay — light energy with efficiency up to 50 % and conversion light energy — electric energy with efficiency up to 35 %. To implement such sources, a closed, safe radioluminescent light source based on  $^{63}\text{Ni}$  and radiophosphors of various colors of luminescence [7] and a spectrally matched semiconductor photoconverter based on semiconductor heterostructures with high efficiency can be used. As a result, it is possible to: simplify the production technology of such sources; modification of the power source (depending on the size of the radioluminescent source; increasing power due to stack architecture (parallel and sequential connection of identical basic elements); use of effective components (radiation-stimulated light sources and photo-converters) of third-party manufacturers; increased functionality due to changes in shape and geometry source; the ability to implement energy storage functions.

When creating isotopic sources of electrical energy based on double conversion, a significant increase in the efficiency of using radioactive decay energy into light energy is possible due to the creation of optimal microstructured radioluminescent compositions based on phosphor and isotope microparticles [8]. In this case, activation and doping of phosphors with nickel isotopes is possible.

The proposed long-life radioisotope power source [9] (fig. 2) contains a housing 1, equipped with external



electrical contacts 2, connected by means of electrical wires 3 to external electrical contacts of two semiconductor photoelectric converters 4, between which the radioluminescent source of optical radiation is located. This light source is a granulated radiophosphor 5 mixed with  $^{63}\text{Ni}$  6 radioisotope particles, which are dissolved in an optically transparent compound, located as a layer between the photosensitive surfaces of semiconductor photoelectric converters 4 with an absorption spectral range consistent with the spectral optical radiation range of the radiophosphor.

The obtainment of  $^{63}\text{Ni}$  microparticles is possible by various methods, for example, laser ablation of metallic nickel in a liquid using a powerful femtosecond laser.

The principle of operation of such a power source is as follows. The electrons with an average energy of 17 keV are emitted in the radioactive beta decay of the  $^{63}\text{Ni}$  isotope. The interaction of the emitted electrons with particles of the radiophosphor, which can be used, for example, the ZnS semiconductor compound doped with Cu, Ag, Mn and other chemical elements, causes radioluminescence (luminescence) of which depends on the doping element, and the intensity on the number of electrons interacting with radiophosphor. Photons arising from radio luminescence, leaving the radiophosphor, fall on the sensitive surfaces of photovoltaic cells operating in the photovoltaic mode. As a result, a constant photovoltage is formed at the output electrical contacts of the photoconverter under the condition that the intensity of the glow of the radioluminescent light source remains unchanged.

For example, the semiconductor  $A^{II}B^{VI}$  compounds doped with  $^{63}\text{Ni}$  can act as radiophosphors, which will ensure even greater efficiency of the radiophosphor due to the location of the source of ionizing radiation inside the particles of the radiophosphor. In addition, the use of  $^{63}\text{Ni}$  as an activator will expand the luminescence spectrum of the phosphor, which is important for applications with photoconverters with a wide spectral range.

To expand the spectral range of the luminescence of a radioluminescent light source when used in conjunction with a wide-range photoconverter in the proposed source, it is possible to use a mixture of powders of radiophosphors with different colors of luminescence activated by various chemical elements. This allows to get a light source with multiple spectral radiation bands. Such a combination will allow more efficient use of a photoconverter with a wide spectral range.

To reduce the cost of production of such a source,  $^{63}\text{NiCl}_2$  particles can be used instead of metallic  $^{63}\text{Ni}$  particles. This eliminates the costly procedure of separating of metallic nickel from  $^{63}\text{NiCl}_2$  solution, which leads to a reduction in the cost of the radioisotope source and the power source as a whole.

In the proposed design, the radioluminescent source of optical radiation is made in the form of a flat sealed glass bulb, located between the photosensitive surfaces of semiconductor photoelectric converters. This option ensures the radiation safety of the radioluminescent source of optical radiation, since the absorption of beta electrons not participating in the process of radioluminescence from particles located on the surface of the radioluminescent composition or close to it, completely occurs in 100  $\mu\text{m}$  glass. Beta particles outflow out of the radioluminescent light source are excluded.

### Calculation of the optimal $^{63}\text{Ni}$ particle diameter

The proposed radioisotope light source solves the problem of maximally using the energy of radioactive decay of the  $^{63}\text{Ni}$  radioisotope for conversion into optical energy. For this, the radioisotope is made in the form of particles with an average size of less than 3  $\mu\text{m}$ . The choice of particle size is associated with the elimination of the effect of self-absorption of energy in the volume of the  $^{63}\text{Ni}$  radioisotope.

Fig. 3 (curve 1) shows the dependence of the surface activity of a spherical nickel particle on its diameter, calculated using the following formula [2]:

$$\sigma_{\text{сф}} = \frac{A_m}{4\mu_m} \left\{ 1 + \frac{2}{(\mu_m d)^2 (D_s)^2} [(1 + \mu_m d D_s) \times \exp(-\mu_m d D_s) - 1] \right\}, \quad (3)$$

where  $D_s$  is the diameter of the sphere.

With a particle size of more than 10  $\mu\text{m}$ , its surface activity remains almost unchanged. This is due to the absorption of beta particles in the nickel particle material. Thus, the use of particles with a diameter of more than 10  $\mu\text{m}$  is impractical. Curve 2 in fig. 3 characterizes the dependence of the fraction of beta particles that have arisen inside a spherical particle and have reached its surface depending on the diameter of the  $^{63}\text{Ni}$  particle.

The proportion of beta particles that have reached the surface of a spherical particle is determined by the expression:

$$\eta_{\text{сф}} = \frac{6}{4\mu_m d D_s} \left\{ 1 + \frac{2}{(\mu_m d)^2 (D_s)^2} \times [(1 + \mu_m d D_s) \exp(-\mu_m d D_s) - 1] \right\}. \quad (4)$$

Here (fig. 3, curve 3), the efficiency of use of beta particles resulting from radioactive decay, defined as the product of the dependences represented by

curves 1 and 2, is shown. As follows from fig. 3 (curve 3), the particle diameter is about 3 microns. In this case, the most efficient use of the expensive  $^{63}\text{Ni}$  is ensured.

### Calculation of the intensity of light emitted by the composite

To improve the efficiency of energy conversion, released from a particle of a radioisotope, the source uses a powder of a radiophosphor with an average particle size of less than 3  $\mu\text{m}$ . These dimensions make it possible to tightly surround a particle of a radioisotope with one or several layers of a radiophosphor, which will ensure that almost all electrons from the radio-isotope enter the radiophosphor and most efficiently convert their energy into photon energy.

The maximum effect is achieved when the concentration of the radioisotope in the composite is 0.1 % (fig. 4). A further increase in the concentration of nickel particles in the phosphor-nickel composite does not lead to an increase in light intensity due to the absorption of optical radiation in the composite.

The intensity of light emitted by the composite of thickness  $L$ , composed of small spherical nickel particles uniformly mixed with the phosphor, is determined by the expression:

$$I = \frac{k\eta_{\beta}S}{\alpha}(1 - e^{-\alpha L}), \quad (5)$$

where  $\alpha$  is the absorption coefficient;  $\eta_{\beta}$  is the concentration of  $\beta$ -particles;  $S$  is the surface area of the sample;  $k$  — quantum yield. The concentration of  $\beta$ -particles and the absorption coefficient are proportional to the volume fraction  $f$  of nickel particles in the composite:

$$\eta_{\beta} = a_1 f, \quad \alpha = a_2 f. \quad (6)$$

Then

$$I = \frac{k a_1 S}{a_2} (1 - e^{-a_2 f L}). \quad (7)$$

From (7) it can be seen that the intensity of the light emitted by the self-luminous composite experiences saturation. For an intensity equal to  $I = 0.95 I_{\text{max}} = 0.95(k a_1 S / a_2)$ , the exponent  $a_2 f L = 3$ , the coefficient  $a_2$  for small filling factors  $f$ , as the calculation shows, turns out to be  $2.3 \cdot 10^5 \text{ cm}$ . Thus, the intensity saturation occurs when the value of the product  $fL$  is  $1.3 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$ . A further increase in the thickness of the composite or the concentration of nickel particles in it does not lead to an increase in the radiation intensity. Thus, if we set the product  $fL$  to be  $1.3 \cdot 10^{-6} \text{ cm}$  (10 times less than the saturating one,  $I = 0.25 I_{\text{max}}$ ), and if it is assumed that the volume fraction of nickel particles  $f$  is equal to 0.001, then the thickness composite will be 13  $\mu\text{m}$ .

As a binder material in a radioluminescent source, an optically transparent compound can be used, which

somewhat reduces the conversion efficiency due to the absorption of a part of the electron energy. The thickness of the radioluminescent light source is selected in the range of 100...150  $\mu\text{m}$ , which ensures maximum light output from the source and low lateral losses. The dependence of the intensity of light emitted by the radiophosphor on its thickness is determined by the formula (5) and is shown in fig. 5. From fig. 5 it can be seen that the dependence of the intensity on the thickness undergoes saturation and increasing the thickness of the light-emitting composite over 100...150  $\mu\text{m}$  does not increase the intensity of the emitted light.

### Comparative calculation of radiation energy yield efficiencies for spherical particles and flat sources based on $^{63}\text{Ni}$

If the efficiency of the emission of  $\beta$ -electrons by spherical particles with a diameter of about 0.5  $\mu\text{m}$  is 5 times higher (fig. 6), then the volume of particles equivalent in activity to  $V_{\text{Ni}}$  will be  $5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3$ . Since the volume fraction of nickel particles in the composite is determined by the expression

$$f = \frac{V_{\text{Ni}}}{V} = \frac{V_{\text{Ni}}}{SL}, \quad (8)$$

where  $S$  is the sample area, then

$$fL = \frac{V_{\text{Ni}}}{S}. \quad (9)$$

To ensure that the condition  $fL = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$  is met, the sample area should be 38  $\text{cm}^2$ .

In this case, the total surface activity of spherical sources with a diameter of 0.1...1  $\mu\text{m}$  is 4—5 times greater than the activity of the flat source of 3  $\mu\text{m}$  thick of the same volume. This effect will be more noticeable if the thickness of the flat source is greater than 3  $\mu\text{m}$ .

The source that contains  $^{63}\text{Ni}$  film with a thickness of 3  $\mu\text{m}$  and an area of 1  $\text{cm}^2$  was chosen as a reference film source. The thickness of the film source is determined from the condition of saturation of the flow of  $\beta$ -particles. Such a film contains a volume of  $^{63}\text{Ni}$ , equal to  $3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$ .

### Conclusion

The design of a radioisotope power source was developed using a radioluminescent light source that contains a granulated radiophosphor mixed with  $^{63}\text{Ni}$  radioisotope particles with an average size of less than 3  $\mu\text{m}$  and a content of more than 0.1 %. Radiophosphor and radioisotope particles are dissolved in an optically transparent compound located in the form of a layer with a thickness of less than 100—150  $\mu\text{m}$  between the photosensitive surfaces of semiconductor photoelectric converters. In this case, the sensitivity spectrum

of photoconverters is matched with the optical emission spectrum of the radiophosphor. The proposed design is a more efficient solution in comparison with designs of radiation-stimulated power sources based on film sources of ionizing radiation and semiconductor converters.

*This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project 16-48-730330 p\_a.*

#### References

1. **Magil J., Galy J.** Radioactivity Radionuclides Radiation. Berlin: Springer, 2005. 259 p.
2. **Bower K. E., Barbanel Y. A., Shreter Y. G., Bohnert G. W.** Polymers, Phosphors, and Voltaics for Radioisotope Microbatteries. Abingdon: CRC Press, 2002. 504 p.

3. **Prelas M. A., Weaver C. L., Watermann M. L.** et al. A review of nuclear batteries, *Progress in Nuclear Energy*, 2014, vol. 75, pp. 117–148.
4. **Friedlander G., Macias E. S., Kennedy J. W.** Nuclear and Radiochemistry. Wiley, 1981. 704 p.
5. **Yao S., Song Z., Wang X.** et al. Design and simulation of betavoltaic battery using large-grain polysilicon, *Applied Radiation and Isotopes*. 2012, vol. 70, no. 10, pp. 2388–2394.
6. **Luque A., Hegedus S.** Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Wiley, 2003. 1138 p.
7. **Mihal'chenko G. A.** Radioluminescentnye izluchateli. Moscow, Atomizdat, 1988. 152 p.
8. **Clothier B. A., Nielsen M. C., Tolliver T. R.** et al. Pat. 20110100439, RADIOISOTOPE POWER SOURCE; publ. May. 2011.
9. **Novikov S. G., Berintsev A. V., Alekseev A. S.** et al.; Radioizotopnyj istochnik jelektricheskogo pitaniya: pat. 169881 RU.; filed 26.06.2016; publ. 05.04.2017.

УДК 621.382.323

DOI:10.17587/nmst.21.153-164

**Н. В. Масальский**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., e-mail: volkov@niisi.rar.ru  
Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований  
Российской академии наук, Москва

## РАСШИРЕННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КНИ МОП-ТРАНЗИСТОРА

Поступила в редакцию 07.11.2018

*Обсуждается подход к моделированию вольт-амперных характеристик субмикронного КНИ МОП-транзистора с учетом механизмов самонагревания и конвективного теплообмена. Транзистор представляется в виде взаимосвязанных моделей: токовая модель в совокупности с моделью самонагревания и тепловая модель, дополненная трансцендентным соотношением для тепловой положительной обратной связи и соотношением для конвективного теплообмена. Предложенная методология позволяет критически оценить вклад рассматриваемых механизмов по отношению к данным, полученным из моделирования с помощью известных схемотехнических программ.*

**Ключевые слова:** технология "кремний на изоляторе", КНИ КМОП-транзистор, саморазогрев, логический вентилятор, моделирование

### Введение

К современным электронным микросхемам предъявляются все более жесткие функциональные требования при снижении габаритных размеров и потребляемой мощности. Масштабирование размеров элементов микросхем и применение технологии кремний-на-изоляторе (КНИ) позволяют повысить быстродействие и снизить энергопотребление [1]. Однако усложнение формы транзисторов приводит к проявлению деградиационных эффектов, которые отражаются на функционировании всей микросхемы. Например, выделение электрической мощности в активной области отдельного элемента (транзистора, диода, резистора

и т. д.) любой микросхемы приводит к его разогреву или самонагреванию [2, 3]. Для КНИ МОП-транзистора толстый погруженный оксид кремния под тонкопленочной кремниевой рабочей областью (областью канала транзистора) является определяющим условием для ярко выраженного проявления эффекта самонагревания. Наиболее сильно и опасно этот эффект проявляется в мощных или постоянно функционирующих КНИ МОП-транзисторах, которые, например, входят в состав генераторов или мультивибраторов [4]. В таком случае вследствие действия положительной электротепловой обратной связи возрастает локальный перегрев устройства, что при определенных условиях может

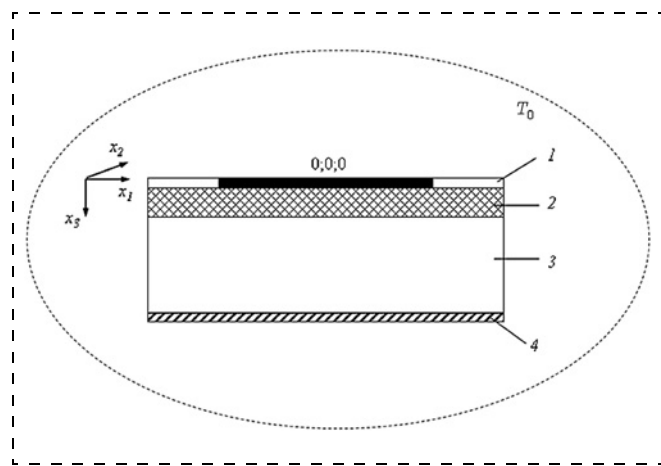
привести к потере устройством функциональной устойчивости.

Помимо процесса саморазогрева протекает процесс теплоотвода от элемента в кремниевую подложку и конвективный теплообмен в окружающую среду. В какой-то момент эти процессы уравниваются друг друга, и температура транзистора больше не растет, наступает так называемое термодинамическое равновесие. Одним из основных механизмов теплообмена в электронных устройствах является конвективный теплообмен [5]. Протекание конвективных процессов теплообмена в электронных системах определяется действием множества факторов. К ним относятся: геометрические размеры конкретного электронного устройства, его конструктивные особенности; пространственное расположение тепловых элементов и их конфигурация; характер циркуляции воздушных потоков в системе.

Адекватный учет взаимосвязи этих процессов позволяет более точно оценить температуру термодинамического равновесия, что является чрезвычайно актуальной и важной задачей при расчете электрических характеристик КНИ МОП-транзисторов и проектировании микросхем, чему посвящена настоящая работа. Недооценка этого факта приводит к необоснованным значениям максимальной температуры отдельного КНИ МОП-транзистора и переоценке его предельных энергетических возможностей и всей микросхемы в целом.

### 1. Электротепловая модель КНИ МОП-транзистора

В модельном представлении структура КНИ МОП-транзистора представляется в виде многослойной системы (рис. 1), каждый  $i$ -й слой которой характеризуется собственным температурным распределением  $T_i$  и теплофизическими параметрами: плотностью  $\rho_i$ , теплоемкостью  $c_i$ , теплопроводностью  $\lambda_i$  [6]. Верхний слой — кремниевая пластина, нижний слой — корпус прибора (теплоотвод). Учитывая, что глубина залегания рабочей области транзистора от верхней поверхности кристалла много меньше толщины полупроводниковой подложки, можно рассмотреть следующее приближение. Пусть источник теплоты расположен на верхней поверхности кристалла и занимает активную область площадью  $s_a$ . Полагаем, что температура  $T_a$  постоянна во всей активной области транзистора и что рассеиваемая транзистором мощность зависит от температуры его активной области, т. е.  $Q_a(T_a)$ . Температуру окружающей среды на расстоянии, многократно превышающем самый большой характерный размер транзистора, считаем постоянной и равной температуре  $T_0$ .



**Рис. 1. Структурная схема КНИ КМОП-транзистора:** 1 — тонкая кремниевая пластина с тепловым источником (активная область транзистора); 2 — пленка SiO<sub>2</sub>; 3 — кремниевая подложка; 4 — корпус прибора (теплоотвод). Штриховой линией обозначена граница, за которой температура постоянна

*Fig. 1. Block diagram of SOI CMOS transistor: 1 — a thin silicon plate with a thermal source (active area of the transistor); 2 — SiO<sub>2</sub> film; 3 — silicon substrate; 4 — case of the device (heat sink). The dashed line designates the border, beyond which the temperature is constant*

С учетом сделанных выше допущений распространение теплоты в пластине подчиняется известному стационарному уравнению теплопроводности [7].

Граничные условия:

— на верхней поверхности структуры

$$\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1(\bar{x})}{\partial n} + \alpha_1 T_1(\bar{x}) = \begin{cases} Q_a, \bar{x} \in G_a, \\ 0, \bar{x} \in G_{ts} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $G_{ts}$ ,  $G_a$  — области, занимаемые верхней поверхностью кристалла и активной частью;  $n$  — вектор внешней нормали к поверхностям;  $\alpha_1$  — коэффициент конвективного теплообмена с окружающей средой;  $x$  — координаты объекта;

— на нижней поверхности ( $i = M$ ) структуры:

$$\lambda_M(T_M) \frac{\partial T_M(\bar{x})}{\partial n} + \alpha_M T_M(\bar{x}) = 0, \quad (2)$$

где  $\bar{x} \in G_{bs}$ ,  $G_{bs}$  — область нижней поверхности;  $\lambda_M$  — коэффициент теплопроводности теплоотвода;  $\alpha_M$  — коэффициент конвективного теплообмена с окружающей средой;

— условия сопряжения на границах контакта двух сред:

$$\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i(\bar{x})}{\partial n} = \lambda_{i+1}(T_{i+1}) \frac{\partial T_{i+1}(\bar{x})}{\partial n}; \quad (3)$$

$$T_i(\bar{x}) = T_{i+1}(\bar{x}),$$

где  $\bar{x} \in G_{c(i)}$ ,  $G_{c(i)}$  — область контакта.

— на боковых поверхностях сткуртуры

$$\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i(\bar{x})}{\partial n} + \alpha T_i(\bar{x}) = 0, \quad (4)$$

где  $\bar{x} \in G_{sf(i)}$ ,  $G_{sf(i)}$  — площадь боковой поверхности  $i$ -го слоя.

Однако в целях упрощения задачи полагаем, что торцы каждого слоя теплоизолированы, т. е. теплообмен отсутствует. Действительно, теплообмен в среду с торцов вследствие их малых толщин незначителен, и торцевым теплообменом можно пренебречь.

Токовая модель КНИ МОП-транзистора состоит из двух взаимосвязанных составляющих. Одна из которых токовая модель для режима сильной инверсии на основе температурно-зависимого распределения поверхностного потенциала [8]. Другая модель для эффекта самонагревания, который в данном случае моделируется с помощью теплового сопротивления  $R_{th}$  и тепловой емкости  $C_{th}$ , значения которых на начальном этапе моделирования неизвестны [9]. В общем случае в активной области транзистора возникает локальный перегрев, что приводит к росту температуры активной области  $T_a$ . Высокая температура активной области снижает подвижность и скорость насыщения носителей, что приводит к уменьшению тока транзистора  $I_{ds}$  [10]. Поэтому рассматриваемый механизм является самым серьезным ограничением при высоких значениях затворных ( $U_{gs}$ ) и стоковых ( $U_{ds}$ ) напряжений. При невысоких затворных напряжениях температура  $T_a$  растет медленно и влияние механизма самонагревания на ВАХ транзистора незначительно. При высоких  $U_{gs}$  параметр  $T_a$  растет очень быстро, что обуславливает проявление эффекта самонагревания в виде отрицательной дифференциальной проводимости стока  $g_{ds}$ . Значение этой проводимости ограничено механизмом модуляции длины канала, DIBL-эффектом и положительной тепловой обратной связью [9]. Характеристическая частота  $g_{ds}$  определена тепловой временной константой  $\tau_{th} = R_{th} C_{th}$ . При этом поддерживается следующая взаимосвязь [3]:

$$T_a - T_0 = I_{ds} U_{gs} R_{th} / \sqrt{1 + \left( \frac{2\pi}{R_{th} C_{th}} \right)^2}. \quad (5)$$

Зависимость плотности мощности от температуры активной области определяется из уравнения электротепловой обратной связи с учетом условия сохранения постоянства выделяемой в транзисторе

тепловой мощности [6, 7]. Уравнение электротепловой обратной связи имеет вид:

$$Q_a(T_a) = A_{sh} \exp \left( \frac{E_g(T_a) - q \left( U_{gs} + \frac{r s_a}{U_{ds}} Q_a(T_a) \right)}{k T_a} \right), \quad (6)$$

где  $r$  — входное сопротивление транзистора;  $E_g(T_a)$  — температурная зависимость ширины запрещенной зоны кремния [10];  $A_{sh}$  — коэффициент пропорциональности, независящий от температуры;  $q$  — заряд электрона;  $k$  — постоянная Больцмана.

Самосогласованный свободный конвективный теплообмен электронного элемента со средой анализируется исходя из известных распределений температуры в пластине  $T_p$ , включая активную область, и в среде  $T_c$ , и неизвестных тепловых потоках и температуре на границе их раздела [11]. Затем совмещаются распределения, приравняв в каждой точке границы тепловые потоки и температуру со стороны пластины и со стороны среды. В общем случае задача моделирования конвективного теплопереноса связана с самосогласованным решением уравнений Навье — Стокса непрерывности, теплопроводности в окружающей среде, а также уравнений теплопроводности в кремниевой пластине с источниками теплоты. Эти уравнения описывают процесс взаимодействия между температурными полями пластины и окружающей воздушной среды. Этот процесс возникает в результате конвективного обмена, который сложным образом зависит не только от температурных полей, но и от векторного поля скоростей в каждой точке окружающей пластину среды. Особенностью данного рассмотрения является то, что на границе соприкосновения разнородных областей используются условия равенства температур тепловых потоков в каждой точке на границе раздела сред.

В термодинамическом равновесии задачу распределения температуры по пластине можно свести к двум задачам: двумерной по поверхности пластины и одномерной по оси ортогональной поверхности пластины, проходящей через центр активной области транзистора. В данном приближении применим подход аппроксимации решения уравнения теплопроводности параболой [12]. Это позволяет получить в аналитической форме выражение для температуры на границе раздела транзистор—среда, которое упрощает анализ зависимости данного параметра от различных физических и топологических факторов. Например, вывод соотношения, связывающего тепловую мощность

$Q_a$  транзистора с разностью температур его поверхности и окружающей среды  $T_a - T_c$  в виде [13]:

$$Q_a = 0,75\lambda_c W_4 \sqrt{\frac{\beta t_s^3}{\nu^2} (T_a - T_c)^5}, \quad (7)$$

где  $\lambda_c$  — теплопроводность среды;  $W$  — ширина транзистора;  $t_s$  — толщина канала транзистора;  $\beta$  — коэффициент объемного расширения;  $\nu$  — кинематическая вязкость среды.

В результате сделанных ограничений температурное поле в данном объекте можно найти с помощью решения системы нелинейных уравнений теплопроводности с граничными условиями и уравнения электротепловой обратной связи.

## 2. Моделирование электротепловых характеристик КНИ МОП-транзистора

Для того чтобы оценить адекватность рассматриваемого подхода в рамках отечественной технологии КНИ КМОП, в качестве основы была выбрана базовая технология с проектными нормами 0,25 мкм [14, 15]. Для моделирования электротепловых характеристик КНИ МОП-транзистора рассматривается следующая структура. Она представляет собой четырехслойную систему: слой 1 (верхний слой) — прямоугольный кремниевый кристалл с активной областью; слой 2 — прямоугольный слой оксида кремния с размерами; слой 3 — кремниевая пластина; слой 4 (нижний слой) — неидеальный теплоотвод (основание корпуса) с конечной теплопроводностью. Источник теплоты расположен на верхней поверхности кристалла и занимает активную область площадью  $s_a = WL$ , где  $W, L$  — ширина и длина рабочей (активной) области транзистора.

ВАХ транзистора вычисляют с помощью апробированной модели с учетом температурно-зависимого распределения поверхностного потенциала [8]. Распределения температуры в структуре транзистора рассчитывается численно с использованием итерационного алгоритма во взаимодействии с программной средой COMSOL Multiphysics [16].

Конструктивные параметры КНИ МОП-транзистора  $n$ -типа определяются требованиями технологического маршрута создания МОП-структуры с толщинами подзатворного оксида кремния, кремниевой рабочей области и погруженного оксида 3.5, 30, 150 нм, соответственно. Длина рабочей области (канала) транзистора составляет  $L_g = 0,25$  мкм, ширина — 10 мкм. Концентрация легирования рабочей области  $1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Концентрация легирования областей стока и истока  $5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>.

Геометрические размеры слоев следующие: слой 1 —  $L_{x1}^{(1)} = L_{x2}^{(1)} = 20$  мкм,  $L_{x3}^{(1)} = 0,03$  мкм; слой 2 —  $L_{x1}^{(2)} = L_{x2}^{(2)} = 20$  мкм,  $L_{x3}^{(2)} = 0,15$  мкм; слой 3 —  $L_{x1}^{(3)} = L_{x2}^{(3)} = 10$  мм,  $L_{x3}^{(3)} = 0,6$  мм; слой 4 —  $L_{x1}^{(4)} = L_{x2}^{(4)} = 10$  мм,  $L_{x3}^{(4)} = 1,0$  мм,  $\lambda_4 = 400$  Вт/(м·К). Физические параметры омывающей воздушной массы:  $\rho_B = 1,165$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_B = 0,026$  Вт/(м·К),  $\nu = 0,000016$  м<sup>2</sup>/с. Температура  $T_0 = 25$  °С.

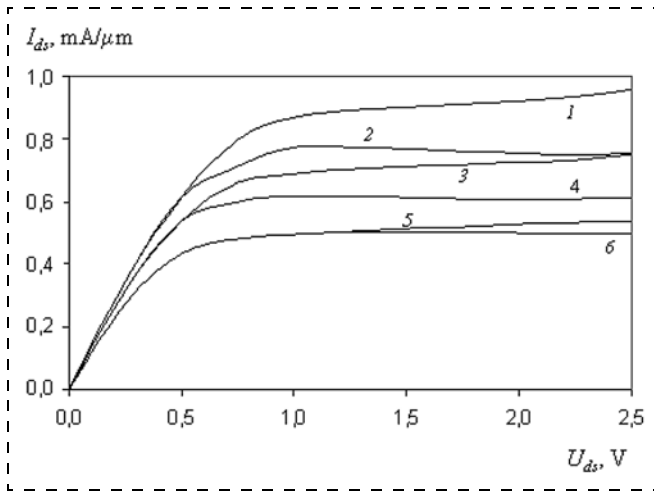
Результаты расчета выходных ВАХ КНИ  $n$ -МОП-транзистора показаны на рис. 2.

В таблице приведена максимальная температура КНИ-транзисторов  $n$ - и  $p$ -типов и влияние саморазогрева на значение максимального тока стока  $I_{ds \max}$  при напряжениях  $U_{ds} = U_{gs} = 2,5$  В. В качестве инструмента сравнения расчетов была использована система приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD [17]. Были разработаны двухмерные модели  $n$ - и  $p$ -канальных КНИ МОП-транзисторов. Полученные результаты моделирования приведены в этой же таблице.

Из результатов моделирования видно, что для КНИ МОП-транзисторов явление саморазогрева проявляется сильно, и их ВАХ имеют ярко выраженный участок "отрицательного дифференциального сопротивления" [2, 3]. Относительное уменьшение максимального значения тока транзистора, вызванное эффектом саморазогрева, в этом случае для  $n$ - и  $p$ -транзисторов достигает 22 % (20 %) и

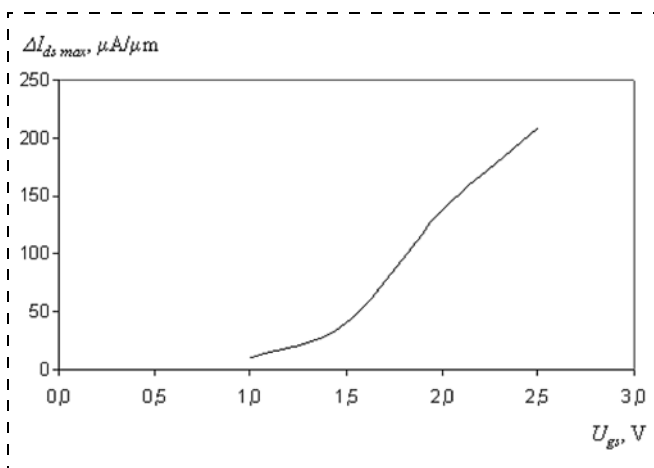
Характеристики транзисторов  
Table of characteristics of transistors

Тип Type	Модель, TCAD Model, TCAD	$T_{\max}$ , °С	$\Delta T_{\max}$ , °С	$I_{ds \max}$ , mA (без саморазогрева) (without self-heating)	$I_{ds \max}$ , mA (саморазогрев) (with self-heating)	$\Delta I_{ds \max}$ , mA
$n$	Модель Model TCAD	196	171	9,5	7,4	2,1
		186	161		7,6	1,9
$p$	Модель Model TCAD	132	107	5,8	4,6	1,2
		124	99		4,7	1,1



**Рис. 2.** ВАХ  $I_{ds}(U_{ds})$  КНИ МОП-транзистора при  $L_g = 250$  nm при  $T_0 = 25$  °C: 1, 2 —  $U_{gs} = 2,5$  В, 3, 4 —  $U_{gs} = 2,0$  В, 5, 6 —  $U_{gs} = 1,5$  В, (нечетный номер кривых — без учета саморазогрева, четный номер — с учетом саморазогрева)

*Fig. 2. VAC of  $I_{ds}(U_{ds})$  SOI MOS transistor at  $L_g = 250$  nm and  $T_0 = 25$  °C: 1, 2 —  $U_{gs} = 2.5$  V, 3, 4 —  $U_{gs} = 2.0$  V, 5, 6 —  $U_{gs} = 1.5$  V, (the odd curve numbers are without account of self-heating, the even numbers take self-heating into account)*



**Рис. 3.** Зависимость снижения тока  $I_{ds\ max}$  вследствие саморазогрева от  $U_{gs}$  при  $T_0 = 25$  °C и  $U_{ds} = 2,5$  В

*Fig. 3. Dependence of a decrease of current  $I_{ds\ max}$  due to self-heating on  $U_{gs}$  at  $T_0 = 25$  °C and  $U_{ds} = 2.5$  V*

20,6 % (19 %), соответственно (в скобках указаны значения, полученные при моделировании с помощью TCAD). Отличие для  $n$ - и  $p$ -транзисторов напрямую связано с температурно-зависимыми особенностями переноса заряда обоих типов транзисторов [10]. Различие в значениях спада тока ( $\Delta I_{ds\ max}$ ) нашей модели и TCAD в процентном отношении составляет примерно 10 %, что может быть существенным для аналоговых приложений [4]. Методика учета влияния механизмов саморазогрева и теплообмена, используемая в настоящей работе, дает более близкие к экспериментальным

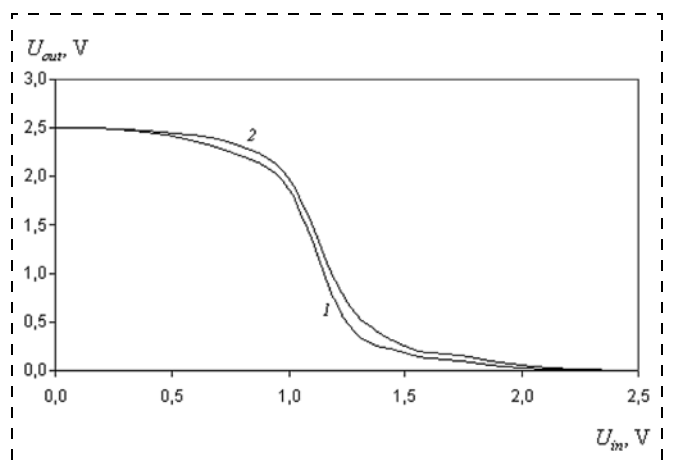
данным результаты в большинстве случаев аналоговых приложений, выполненных по технологии 0,5 мкм [18]. Следует отметить, что учет конвективного теплообмена примерно на один процент увеличивает максимальный ток транзистора, т. е. снижает влияние саморазогрева на токовые характеристики транзистора.

При более низких затворных напряжениях эффект саморазогрева проявляется менее значительно. На рис. 3 приведена зависимость снижения максимального тока транзистора от затворного напряжения, полученная из результатов моделирования.

Уровень потребляемой мощности ниже вследствие более низкого тока транзистора, и она более эффективно отводится через кремниевую пластину. Вклад конвективного теплообмена при снижении рассеиваемой мощности транзистором снижается и он играет все меньшую роль.

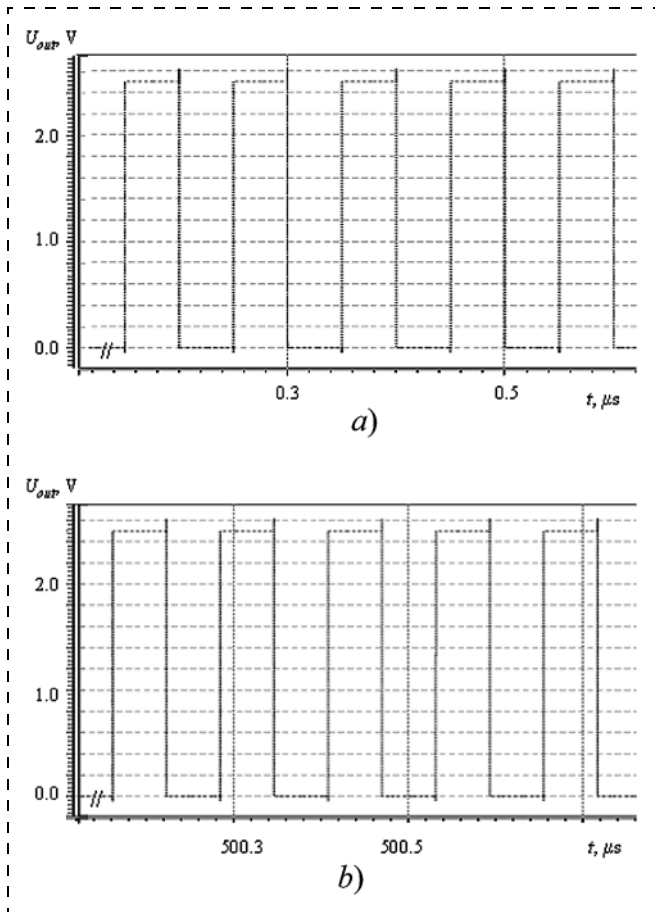
### 3. Влияние эффекта саморазогрева на инвертор

При отсутствии данных по технологическому разбросу параметров КНИ КМОП-транзисторов была разработана цепочка инверторов без каких-либо дополнительных конструктивно-топологических опций. Все транзисторы имеют следующие параметры: тип "Н", длина  $n$ -канального транзистора  $L_n = 0,28$  мкм, ширина  $n$ -канального транзистора  $W_n = 0,86$  мкм и длина  $p$ -канального транзистора  $L_p = 0,24$  мкм, ширина  $p$ -канального транзистора  $W_p = 1,54$  мкм [15]. Топологически инверторы максимально плотно упакованы для упрощения учета конвективного теплообмена. На рис. 4 приве-



**Рис. 4.** Статическая характеристика инвертора: 1 — начальный момент времени; 2 — после термодинамического равновесия (саморазогрев завершен)

*Fig. 4. Static characteristic of the inverter: 1 — initial moment of time; 2 — after achievement of the thermodynamic balance (when self-heating is finished)*



**Рис. 5. Временные диаграммы осциллятора:** *a* — начальный момент времени; *b* — после термодинамического равновесия  
*Fig. 5. Time diagrams of the oscillator:* *a* — initial moment of time; *b* — after achievement of the thermodynamic balance

дены рассчитанные по апробированной методике [19] с учетом изложенной электротепловой модели статические характеристики отдельного инвертора в начальный момент времени и после установления термодинамического равновесия.

Максимальный сдвиг статической характеристики составляет 0,19 В, что соответствующим образом скажется на задержке инвертора. Влияние теплового переходного процесса можно исключить из рассмотрения поскольку характерное время составляет менее 1 нс. Однако следует отметить, что тепловые переходные процессы для транзисторов разных типов протекают неодинаково за счет их разных топологий. В некий момент, когда транзистор *n*-типа перешел в равновесие, а *p*-типа еще нет, максимальный сдвиг практически в 2 раза превышает 0,19 В.

В случае отдельного инвертора конвективный теплообмен не оказывает заметного влияния на ключевые характеристики инвертора.

Влияние саморазогрева на характеристики иллюстрируется анализом цепочки инверторов в виде кольцевого генератора.

На рис. 5 приведены результаты моделирования пятиступенчатого кольцевого осциллятора на выбранных транзисторах.

Влияние эффекта саморазогрева в начальный момент времени незначительно, что отражено на рис. 5, *a*. В начальный момент времени задержка цепочки инверторов составляет 90,5 пс. В дальнейшем задержка увеличивается вследствие саморазогрева транзисторов. Через некоторое время, которое определяется рабочей частотой генератора (чем она ближе к частоте  $f_{th}$ , тем оно меньше), наблюдается снижение частоты генерации. Этот процесс останавливается при достижении термодинамического равновесия. В начальный момент времени частота генерации составляла 10 МГц, после термодинамического равновесия — 8,1 МГц. В процентном отношении снижение частоты примерно равно снижению тока насыщения транзистора вследствие эффекта саморазогрева. В данном случае снижение частоты генерации составляет 19 %.

Сопоставляя полученные данные с результатами моделирования, проведенного с помощью модели BSIMSOI13 [20], параметры которой для моделирования саморазогрева были извлечены из ВАХ, полученных в TCAD, можно сделать вывод о рассогласовании по снижению частоты, равному 0,42 МГц, что составляет ~5 %.

Вклад конвективного теплообмена невелик, так как обобщенная мощность, выделяемая осциллятором, составляет 6,4 мВт. Повышение мощности тепловыделения будет обуславливать возрастающее влияние конвективного теплообмена. Например, увеличение выделяемой мощности до 1 Вт обеспечивает снижение до 12 % температуры термодинамического равновесия [5], что напрямую невозможно промоделировать в современных схемотехнических программах [20, 21]. Для учета этого необходимо извлекать параметры транзисторов в конкретных условиях теплообмена, что практически невозможно осуществить за разумные средства. Более того, невозможно оптимизировать условия конвективного теплообмена и сформулировать конструкционные требования, если проводить моделирование без его учета. Поэтому предложенная методика является очень актуальной при проектировании современных микросхем.

И еще одно важное наблюдение. При меньших затворных напряжениях снижение частоты генерации будет становиться меньше вследствие уменьшения влияния эффекта саморазогрева. И в конечном итоге частота не будет уменьшаться. При этом задержка вырастет. В данном случае это произойдет при  $U_{gs} = 1,3$  В, когда разность токов  $I_{ds\ max}$  с учетом и без учета саморазогрева составит менее 2 % и задержка будет уже 142 пс.



## Заключение

На основе известных теоретических и экспериментальных данных разработана методика расширенного моделирования ВАХ субмикронного КНИ МОП-транзистора с учетом механизмов самонагрева и конвективного теплообмена. Адекватный учет взаимосвязи этих процессов позволяет более точно оценить температуру термодинамического равновесия и связанные с ней электрофизические характеристики КНИ МОП-транзистора, что является чрезвычайно актуальной и важной задачей при разработке и проектировании микросхем. Электротепловая модель транзистора представляется в виде многослойной структуры, где в верхнем слое расположена активная область (канал транзистора), которая является источником тепловой мощности. Она генерируется вследствие протекания тока через транзистор. Апробированная токовая математическая модель дополнена моделью самонагрева с трансцендентным уравнением для электротепловой положительной обратной связи и соотношением для конвективного теплообмена. Методика, используемая в настоящей работе, дает более близкие к экспериментальным данным результаты в большинстве случаев и позволяет учитывать и оптимизировать конвективный теплообмен (при этом учитывается теплообмен через подложку и корпус прибора).

Предложенная методика позволяет критически оценить вклад эффекта саморазогрева по отношению к данным, полученным при моделировании с помощью известных схемотехнических программ. Недооценка этого факта приводит к необоснованным значениям максимальной температуры отдельного КНИ МОП-транзистора и переоценке его предельных энергетических возможностей и всей микросхемы в целом, что особенно важно для аналоговых приложений.

*Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований РАН № 43.35 НИР № 0065-2019-0001.*

### Список литературы

1. **Colinge J. P.** Multiple-gate SOI MOSFETs // Solid-State Electronics. 2004. Vol. 48, N 3. P. 897–909.
2. **Wang L., Fjeldly T., Iniguez B., Slade H., Shur M.** Self-heating and kink effects in a-Si:H thin film transistors // IEEE Trans Electron Device. 2000. Vol. 47, N 2. P. 387–397.
3. **Jin W., Liu W., Fung S., Chan P., Hu C.** SOI thermal impedance extraction methodology and Its significance for circuit simulation // IEEE Trans Electron Device. 2001. Vol. 48, N 4. P. 730–736.

4. **Razavi B.** CMOS technology characterization for analog and RF design // IEEE Journ. on Solid-State Circuits. 1999. Vol. 34, N 3. P. 268–276.
5. **Конструкции корпусов и тепловые свойства полупроводниковых приборов /** Под общей ред. Н. Н. Горюнова. М.: Энергия, 1972. 120 с.
6. **McAlister S. P., Lafontaine H.** Self heating in millimeter SiGe HBTs // Solid State Electronics. 2004. Vol. 48, N 6. P. 2001–2006.
7. **Marani R., Perri A. G.** Analytical electro thermal modeling of multi layer structure electronic devices // The Open Electrical & Electronic Engineering Journal. 2010. N 4. P. 32–39.
8. **Епихин Е. Н., Масальский Н. В.** К вопросу учета диэлектрических свойств кремния при схемотехническом моделировании // Труды НИИСИ РАН. 2015. Т. 5, № 2. С. 67–71.
9. **Fiegna C., Yang Y., Sangiorgi E., O'Neill A. G.** Analysis of self-heating effects in ultra thin body SOI MOSFETs by device simulation // IEEE Trans. Electron. Devices. 2008. Vol. 55, N 1. P. 233–244.
10. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов. Ч. 1. М.: Мир, 1984. 455 с.
11. **Козлов Н. А., Нечаев А. М., Синкевич В. Ф.** Расчет стационарных тепловых полей в структурах мощных транзисторов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 1989. Вып. 1 (198). С. 19–24.
12. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 744 с.
13. **Дульнев Г. Н.** Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
14. **Транзистор со структурой металл—оксид—полупроводник на подложке кремний на изоляторе:** пат. 2477904 Рос. Федерация: МПК H01L29/78/ Бабкин С. И., Волков С. И., Глушко А. А.; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Научно-исследовательский институт системных исследований РАН (НИИСИ РАН) (RU); заявл. 25.07.2011; опубл. 20.03.2013.
15. **Волков С. И.** Опыт разработки радиационно-стойких библиотек и СБИС с применением специализированной САПР. URL: <http://www.myshared.ru/slide/467770/> (дата обращения: 17.02.2018).
16. **Программное обеспечение для расширенного моделирования теплопередачи.** URL: <https://www.comsol.ru/heat-transfer-module> (дата обращения 17.02.2018).
17. **TCAD Sentaurus Device.** URL: <https://www.synopsys.com/silicon/tcad/device-simulation/sentaurus-device.html> (дата обращения 21.11.2017).
18. **Watson J., Castro G.** High temperature electronic pose design and reliability challenge // Analog Dialog. 2012. Vol. 46. <http://www.analog.com/> (дата обращения: 22.08.2018).
19. **Масальский Н. В.** Синтез характеристик логических вентилей на двухзатворных суб-25 нанометровых КНИ КМОП-транзисторах для маломощных применений // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 5. С. 41–46.
20. **BSIMSOI3.1.** MOSFET model user manual, University of California, Berkeley; 2003. URL: <https://www.-devices.eecs.berkeley.edu/bsimsio.html> (дата обращения 3.06.2018).
21. **Compact Model Council.** Online: <https://www.geia.org/CMC-Council/> (дата обращения 17.06.2017).
22. **Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis.** URL: <https://www.stanford.edu/class/ee101b/hspice.html> (дата обращения 15.03.2017).

**N. V. Masalsky**, Ph. D., Chef Chair,

Federal State institution "Federal Scientific Center Research Institute of System Researches of the Russian Academy of Sciences", Moscow, volkov@niisi.ras.ru

*Corresponding author:*

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

## Expanded Approach for Simulation of I-V data to the SOI CMOS Transistor

Received on November 07, 2018

Accepted on November 26, 2018

*On the basis of the known theoretical and experimental data the technique of expanded simulation I—V data for the sub micron SOI CMOS transistor taking into account mechanisms of self-heating and convective heat exchange is considered. Adequate accounting of correlation of these processes allows to evaluate more precisely thermodynamic equilibrium temperature and the related electro-physical characteristics of the SOI CMOS transistor that is extremely relevant and important task by development and design of chips. The warm and electrical model of the transistor is presented in the form of multi-layer structure where in the upper layer the active area (the channel of the transistor) that is a thermal power source is located. Thermal power is generated in a consequence of course of current via the transistor. The approved current model is added by self-heating model with the transcendental equation for thermal positive back coupling and a equation for convective heat exchange. The technique used in the real paper yields results, more close to the experimental data, in most cases and allows to consider and optimize convective heat exchange (at the same time heat exchange through a substrate and the casing of the device is considered). The offered methodology allows to evaluate critically a contribution of the considered mechanisms in relation to the data obtained from simulation by means of the known programs of physic-technological and circuitry simulation.*

*From results of simulation for I—V data SOI CMOS transistors with 0.25  $\mu\text{m}$  long channel is visible that they have a pronounced section of "negative differential resistance" in the field of high gate and drain supply voltages. It is directly connected to the transistor self-heating mechanism. The relative reduction of the maximum current value of the transistor for n- and p- type transistors is reached by 22 % (20 %) and 20,6 % (19 %), respectively, (in brackets the indicated values received from simulation through TCAD).*

*Influence of effect of a self-heating on the frequency of generation for a network of SOI CMOS inverters is probed. In initial time point the generation frequency was 10 MHz, after thermodynamic equilibrium 8.1 MHz. In percentage terms value of lowering of frequency is approximately equal to lowering of a saturation current of the transistor in a consequence of effect of a self-heating. In this case lowering of frequency of generation makes 19 %. Comparing our data, with results of the simulation which is carried out by means of the BSIMSOI13 model which parameters for simulation of a self-heating were derived from I—V data received from TCAD lowering of frequency 1.48 MHz make.*

**Keywords:** the "silicon on insulator" technology, SOI CMOS transistor, self-heating, logical gate, simulation

*For citation:*

**Masalsky N. V.** Expanded Approach for Simulation of I-V data to the SOI CMOS Transistor, *Nano- and microsystemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 153—164.

DOI: 10.17587/nmst.21.153-164

### Introduction

Electronic microcircuits have to meet rigid functional demands, including smaller overall dimensions and power consumption. Scaling of the sizes of the microcircuit elements and application of the silicon-on-insulator technology (SOI) allow us to raise their speed and to lower their energy consumption [1]. However, complication of the form of the transistors results in degradation effects, which tell on the functioning of the whole of a microcircuit. For example, release of electric power in the active area of a separate element (transistor, diode, resistor, etc.) in any microcircuit leads to its warming up or self-heating [2, 3]. For SOI MOS transistor a thick submerged silicon oxide under a thin-film silicon working area (area of the transistor channel) is a major condition for a strongly pronounced effect of self-heating. This effect is most strong and dangerous in the powerful or constantly functioning SOI MOS tran-

sistors which, for example, are a part of the generators or multivibrators [4]. In this case, owing to a positive electrothermal feedback the local overheat of a device increases, which, under certain conditions, can lead to a loss of the functional stability of the device.

Besides self-heating, there is a process of heat removal from the element into the silicon substrate and a convective heat exchange into the environment. In a certain moment these processes counterbalance each other, the transistor temperature does not go up any more, and the so-called thermodynamic balance is achieved. The convective heat exchange [5] is one of the basic mechanisms of heat exchange in the electronic devices. The convective heat exchange processes in the electronic systems are determined by numerous factors. Among them are the geometrical sizes of an electronic device, its design features, the spatial arrangement of the thermal elements and their configuration, and the character of circulation of the air flows in the system.

An adequate account of the interrelation of these processes allows us to estimate precisely the temperature of the thermodynamic balance, which is extremely topical and important for calculation of the electric characteristics of SOI MOS transistors and designing of microcircuits, the problems, to which the present work is devoted. An underestimation of this fact may lead to unreasonable values of the maximal temperature of a separate SOI MOS transistor and overestimation of its limiting power potentials and of all the microcircuit as a whole.

### 1. An electrothermal model of SOI MOS transistor

Simulation presents the structure of SOI MOS transistor in the form of a multilayered system (see fig. 1), each  $i$  layer of which is characterized by its own temperature distribution  $T_i$  and the thermalphysic parameters: density  $\rho_i$ , thermal capacity  $c_i$ , heat conductivity  $\lambda_i$  [6]. The top layer is a silicon plate, the bottom layer is the case of the device (heat sink). Considering the fact, that the depth of the position of the working area of the transistor from the top surface of a crystal is considerably less than the thickness of the semi-conductor substrate, it is possible to consider the following approach. Let us assume that the warmth source is located on the top surface of the crystal and occupies the active area of  $s_a$ . We will also assume that  $T_a$  is constant in all of the active area of the transistor and that the power scattered by the transistor depends on the temperature of its active area, that is,  $Q_a(T_a)$ . The ambient temperature at the distance, many times exceeding the biggest characteristic size of the transistor, we consider as constant and equal to temperature  $T_0$ .

Taking into account the above assumptions, the warmth distribution in the plate submits to the known stationary equation of heat conductivity [7].

The boundary conditions:

– On the top surface of the structure

$$\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1(\bar{x})}{\partial n} + \alpha_1 T_1(\bar{x}) = \begin{cases} Q_a, \bar{x} \in G_a \\ 0, \bar{x} \in G_{ts} \end{cases}, \quad (1)$$

where  $G_{ts}$ ,  $G_a$  – the areas occupied by the top surface of the crystal and the active part,  $n$  – vector of the external normal to the surfaces,  $\alpha_1$  – coefficient of the convective heat exchange with the environment;  $\bar{x}$  – object co-ordinates;

– on the bottom surface of ( $i = M$ ) structure

$$\lambda_M(T_M) \frac{\partial T_M(\bar{x})}{\partial n} + \alpha_M T_M(\bar{x}) = 0, \quad (2)$$

where  $\bar{x} \in G_{bs}$ ,  $G_{bs}$  – area of the bottom surface,  $\lambda_M$  – coefficient of the thermal conductivity of the heat sink,  $\alpha_M$  – coefficient of the convective heat exchange with the environment;

– interface conditions on the borders of contact of the two environments:

$$\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i(\bar{x})}{\partial n} = \lambda_{i+1}(T_{i+1}) \frac{\partial T_{i+1}(\bar{x})}{\partial n}; \quad (3)$$

$$T_i(\bar{x}) = T_{i+1}(\bar{x}),$$

where  $\bar{x} \in G_{c(i)}$ ,  $G_{c(i)}$  – contact area.

– on the lateral surfaces of the structure

$$\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i(\bar{x})}{\partial n} + \alpha T_i(\bar{x}) = 0, \quad (4)$$

where  $\bar{x} \in G_{sf(i)}$ ,  $G_{sf(i)}$  – area of the lateral surface of  $i$ -layer.

However, for the purpose of problem simplification we assume, that the end faces of each layer are heat-insulated, i.e., there is no heat exchange. In fact, the heat exchange from the end faces to the environment is insignificant, because of their small thicknesses, and the end-face heat exchange can be neglected.

The current model of the SOI MOS transistor consists of two interconnected components. One of which is the current model for the mode of a strong inversion on the basis of the temperature-dependent distribution of the surface potential [8]. The other model is for the self-heating effect, which in this case is simulated by means of thermal resistance  $R_{th}$  and thermal capacity  $C_{th}$ , the values of which at the initial stage of simulation are unknown [9]. Generally, in the active area of the transistor a local overheat occurs, leading to a temperature growth in the active area of  $T_a$ . The high temperature in the active area reduces the mobility and the speed of saturation of the carriers, which leads to reduction of the current of transistor  $I_{ds}$  [10]. Therefore, the considered mechanism is the most serious restriction at high values of the gate ( $U_{gs}$ ) and the drain ( $U_{ds}$ ) voltages. At the low gate voltages the temperature of  $T_a$  grows slowly and the influence of the mechanism of self-heating on VAC of the transistor is insignificant. At high  $U_{gs}$  the parameter of  $T_a$  grows very quickly, which causes the self-heating effect in the form of the negative differential conductivity of drain  $g_{ds}$ . The value of this conductivity is limited by the mechanism of modulation of the length of the channel, DIBL effect and the positive thermal feedback [9]. The characteristic frequency of  $g_{ds}$  is defined by the thermal time constant  $\tau_{th} = R_{th} C_{th}$ . At that, the following interrelation [3] is supported:

$$T_a - T_0 = I_{ds} U_{gs} R_{th} / \sqrt{1 + \left( \frac{2\pi}{R_{th} C_{th}} \right)^2}. \quad (5)$$

The dependence of the power density on the temperature of the active area is found from the equation of the electrothermal feedback taking into account the condition of preservation of constancy of the thermal

power allocated in the transistor [6, 7]. The equation of the electrothermal feedback looks like the following:

$$Q_a(T_a) = A_{sh} \exp \left( \frac{E_g(T_a) - q \left( U_{gs} + \frac{r s_a}{U_{ds}} Q_a(T_a) \right)}{k T_a} \right), \quad (6)$$

where  $r$  — input resistance of the transistor;  $E_g(T_a)$  — temperature dependence of the width of the forbidden zone of silicon [10];  $A_{sh}$  — proportionality coefficient, independent of temperature;  $q$  — electron charge;  $k$  — Boltzmann constant.

The self-consistent free convective heat exchange of an electronic element with the environment is analyzed proceeding from the known distributions of temperature in plate  $T_p$ , including the active area, and in the environment of  $T_c$ , and unknown thermal flows and temperature on their section borders [11]. Then the distributions are combined, having equated in each point of the borders the thermal flows and the temperatures from the plate and from the environment. Generally, the simulation problem of the convective heat exchange is connected with the self-consistent solution of Navier-Stokes equations, continuity, heat conductivity in the environment, and also the heat conductivity equations in a silicon plate with the warmth sources. These equations describe the process of interaction between the temperature fields of the plate and the surrounding air environment. This process results from the convective exchange, and in a complex way it depends not only on the temperature fields, but also on the vector field of the speeds in each point of the environment surrounding the plate. A specific feature of the given consideration is that on the border of contact of the diverse areas the conditions of equality of the temperatures of the thermal flows in each point on the section border of the environments are used.

In the thermodynamic balance the problem of distribution of temperature on a plate can boil down to two problems: a two-dimensional one on the plate surface and single-dimensional one on the axis of the orthogonal surface of the plate, passing through the centre of the active area of the transistor. In the given case we can apply the approach of approximation for solving of the equation of heat conductivity by means of a parabola [12]. This allows us to receive the expression in an analytical form for the temperature on the transistor-environment border, which simplifies the analysis of the dependence of the given parameter on various physical and topological factors. For example, the derivation of the correlation connecting thermal power  $Q_a$  of the transistor with the difference of temperatures of its surface and the environment  $T_a - T_c$  in the following form [13]:

$$Q_a = 0,75 \lambda_c W_4 \sqrt[3]{\frac{\beta T_s^3}{\nu^2} (T_a - T_c)^5}, \quad (7)$$

where  $\lambda_c$  — thermal conductivity of the environment,  $W$  — width of the transistor,  $t_s$  — thickness of the transistor channel,  $\beta$  — coefficient of volumetric expansion,  $\nu$  — kinematic viscosity of the environment.

As a result of the introduced restrictions, the temperature field in the given object is found by means of solving of a system of the nonlinear equations of heat conductivity with the boundary conditions and the equations of the electrothermal feedback.

## 2. Simulation of the electrothermal characteristics of SOI MOS transistor

In order to estimate the adequacy of the considered approach within the framework of the domestic SOI CMOS technology, as the basic, the technology was chosen with the design standards of 0.25  $\mu\text{m}$  [14, 15]. For simulation of the electrothermal characteristics of SOI MOS transistor the following structure is considered. It is a four-layer system: layer 1 (the top layer) is a rectangular silicon crystal with the active area; layer 2 is a rectangular layer of silicon oxide; layer 3 is a silicon plate; layer 4 (the bottom layer) is a nonideal heat sink (case basis) with the final heat conductivity. The warmth source is located on the top surface of the crystal and occupies the active area of  $s_a = W \times L$ , where  $W$ ,  $L$  — width and length of the working (active) area of the transistor.

VAC of the transistor are calculated by means of the approved model taking into account the temperature-dependent distribution of the surface potential [8]. The temperature distributions in the transistor structure are calculated numerically with the use of an iterative algorithm in interaction with COMSOL Multiphysics program environment [16].

The design parameters of SOI MOS transistor of  $n$ -type are defined by the requirements of the technological route for creation of MOS structure with the thicknesses of the subgate silicon oxide, silicon working area and submerged oxide of 3.5, 30, and 150 nm, accordingly. The length of the working area (channel) of the transistor is  $L_g = 0.25 \mu\text{m}$ , the width is 10  $\mu\text{m}$ . The concentration of doping of the working area is  $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . The concentration of doping of the drain and source areas is  $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . The geometrical sizes of the layers: layer 1  $L_{x1}^{(1)} = L_{x2}^{(1)} = 20 \mu\text{m}$ ,  $L_{x3}^{(1)} = 0.03 \mu\text{m}$ ; layer 2  $L_{x1}^{(2)} = L_{x2}^{(2)} = 20 \mu\text{m}$ ,  $L_{x3}^{(2)} = 0.15 \mu\text{m}$ ; layer 3  $L_{x1}^{(3)} = L_{x2}^{(3)} = 10 \text{ mm}$ ,  $L_{x3}^{(3)} = 0.6 \text{ mm}$ ; layer 4  $L_{x1}^{(4)} = L_{x2}^{(4)} = 10 \text{ mm}$ ,  $L_{x3}^{(4)} = 1.0 \text{ mm}$ ,  $\lambda_4 = 400 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Physical parameters of the washing air mass:  $\rho_B = 1.165 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $\lambda_B = 0.026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $\nu = 0.000016 \text{ m}^2/\text{s}$ . Temperature  $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

The results of calculation of the output VAC of SOI  $n$ -MOS transistor are demonstrated in fig. 2.

The table presents the maximal temperature of SOI transistors of  $n$ - and  $p$ -types and influence of self-heating on the value of the maximal drain current of  $I_{ds\ max}$  at voltages  $U_{ds} = U_{gs} = 2.5$  V. As the tool for comparison of the calculations, Sentaurus TCAD system of instrument-technological simulation was used [17]. Two-dimensional models of  $n$ - and  $p$ -channel SOI MOS transistors were developed. The received simulation results are presented in the same table.

From the simulation results it is visible, that for SOI MOS transistors the self-heating phenomenon is pronounced strongly, and that their VAC have a strongly pronounced site of "a negative differential resistance" [2, 3]. A relative reduction of the maximal value of the transistor current, caused by the self-heating effect, in this case for  $n$ - and  $p$ -transistors, reaches 22 % (20 %) and 20.6 % (19 %), accordingly (in brackets the values received during simulation by means of TCAD are presented).

The difference for  $n$ - and  $p$ -transistors is directly connected with the temperature-dependent features of the charge transfer for both types of the transistors [10]. A distinction in values of the current recession ( $\Delta I_{ds\ max}$ ) of our model and TCAD in percentage terms is approximately 10 %, which can be essential for the analogue applications [4]. The technique for taking into account the influence of self-heating and heat exchange mechanisms, employed in the present work, yields results closer to the experimental data in most cases of the analogue applications made by 0.5  $\mu\text{m}$  technology [18]. It is necessary to point out, that account of the convective heat exchange approximately by one percent increases the maximal current of the transistor, i.e., reduces the self-heating influence on the current transistor characteristics.

At the lower gate voltages the self-heating effect is less pronounced. Fig. 3 presents the dependence of the maximal transistor current on the gate voltage, received from the simulation results.

The level of the power consumption is lower due to a lower transistor current, and it is more effectively taken away through a silicon plate. The contribution of the convective heat exchange decreases during a decrease of the power scattered by the transistor and it plays a lesser role.

### 3. Influence of the self-heating effect on the inverter

In absence of the data concerning the technological spread of SOI CMOS parameters of the transistors, a chain of inverters was developed without any additional design-topological options. All the transistors had the following parameters: type "H", transistor length —  $L_n = 0.28$   $\mu\text{m}$ , transistor width —  $W_n = 0.86$   $\mu\text{m}$  and length of  $p$ -channel transistor —  $L_p = 0.24$   $\mu\text{m}$ , width of  $p$ -channel transistor —  $W_p = 1.54$   $\mu\text{m}$  [15]. Topo-

logically the inverters are most tightly packed for a simplified account of the convective heat-exchange. Fig. 4 demonstrates the statistical characteristics, calculated by the approved method [19] with account of the presented electrothermal model, of a separate inverter in the initial moment of time and establishment of the thermodynamic balance.

The maximal shift of the static characteristic is 0.19 V, which in corresponding way will affect the inverter delays. The influence of the thermal transient process can be excluded from consideration, because the characteristic time is less than 1 nanosecond. However, it is necessary to point out, that the thermal transient processes for transistors of different types proceed unequally because of their different topologies. In a certain moment, when the transistor of  $n$ -type passes into a balance, but  $p$ -type is still not available, the maximal shift exceeds 0.19 V practically 2 times.

In case of a separate inverter, the convective heat exchange does not render an appreciable influence on the key characteristics of the inverter.

Influence of self-heating on the characteristics is illustrated by an analysis of a chain of inverters in the form of a ring generator.

Fig. 5 presents results of simulation of a five-step ring oscillator on the selected transistors.

Influence of the self-heating effect during the initial moment of time is insignificant, which is reflected in fig. 5, *a*. During the initial moment of time the delay of the chain of inverters was 90.5 ps. Then this delay increased owing to self-heating of the transistors. After a certain time, which was defined by the working frequency of the generator (the closer it was to frequency  $f_{th}$  — the less it was), a decrease in the oscillation frequency was observed. This process stopped after achievement of a thermodynamic balance. During the initial moment of time the oscillation frequency was 10 MHz, after achievement of the thermodynamic balance it was 8.1 MHz. In percentage terms the frequency decrease was approximately equal to the decrease of the saturation current of the transistor due to the self-heating effect. In this case the decrease of the oscillation frequency was 19 %.

Comparing the obtained data with the results of the simulation done by means of BSIMSOI13 model [20], the parameters of which for the simulation of self-heating were taken from VAC received in TCAD, it is possible to draw a conclusion on a mismatch concerning the decrease of frequency, which equals to 0.42 MHz or ~5 %.

The contribution of the convective heat exchange is insignificant, because the generalized power allocated by the oscillator equals to 6.4 mW. Increase of the power of the thermal emission will cause a growing influence of the convective heat exchange. For example, an increase of the generated power up to 1 W ensures a decrease of the temperature of the thermodynamic balance down to 12 % [5], which is impossible to simulate di-

rectly in the modern circuit programs [20, 21]. In order to take this into account, it is necessary to measure the parameters of the transistors in the concrete conditions of the heat exchange, which is practically impossible to do for reasonable means. Moreover, it is impossible to optimize the conditions of the convective heat exchange and to formulate the design requirements, if simulation is done without its account. Therefore, the proposed technique is very topical for designing of modern microcircuits.

And one more important observation. At smaller gate voltages the decrease of the oscillation frequency will be less, because of the reduction of the influence of the self-heating effect. And, finally, the frequency will not decrease. At that, the delay will grow. In this case it will occur at  $U_{gs} = 1.3$  V, when the difference of currents  $I_{ds\ max}$  with account and without account of self-heating will be less than 2 % and the delay will be already 142 ps.

## Conclusion

On the basis of the known theoretical and experimental data a technique was developed for an expanded simulation of VAC of the submicronic SOI MOS transistor, taking into account the mechanisms of self-heating and convective heat exchange. An adequate account of the interrelation of these processes allows us to estimate more precisely the temperature of the thermodynamic balance and the electrophysical characteristics of the SOI MOS transistor connected with it, which is an extremely topical and important task for development and designing of the microcircuits. The electrothermal model of the transistor is presented in the form of a multilayered structure, where in the top layer the active area is (the transistor channel), which is the source of the thermal power. It is generated due to the current passing through the transistor. The approved current mathematical model is complemented by a model of self-heating with a transcendental equation for the electrothermal positive feedback and a correlation for the convective heat exchange. The methods used in the present work provide the results close to the experimental data in most cases and this allows us to consider and optimize the convective heat exchange (at that, the heat exchange through the substrate and case of the device are also considered).

The proposed technique allows us to estimate critically the contribution of the self-heating effect in relation to the data received during simulation by means of the known circuit programs. Underestimation of this fact results in unreasonable values of the maximal temperature of a separate SOI MOS transistor and overestimation of its limiting power potentials and of all the microcircuit as a whole, which is especially important for the analogue applications.

The work was done with support of the Program of Fundamental Research of the Russian Academy of Sciences NIR № 0065-2019-0001.

## References

1. Colinge J. P. Multiple-gate SOI MOSFETs, *Solid-State Electronics*, 2004, vol. 48, no. 3, pp. 897–909.
2. Wang L., Fjeldly T., Iniguez B., Slade H., Shur M. Self-heating and kink effects in a-Si:H thin film transistors, *IEEE Trans Electron Device*, 2000, vol. 47, no. 2, pp. 387–397.
3. Jin W., Liu W., Fung S., Chan P., Hu C. SOI thermal impedance extraction methodology and Its significance for circuit simulation, *IEEE Trans Electron Device*, 2001, vol. 48, no. 4, pp. 730–736.
4. Razavi B. CMOS technology characterization for analog and RF design, *IEEE Journ. on Solid-State Circuits*, 1999, vol. 34, no. 3, pp. 268–276.
5. Gorunov N. N. *Konstruksii korpusov i teplovie svoystva poluprovodnikovix priborov*, Moscow, Energia, 1972, 120 p. (in Russia).
6. McAlister S. P., Lafontaine H. Self heating in millimeter SiGe HBTs, *Solid State Electronics*, 2004, vol. 48, no. 6, pp. 2001–2006.
7. Marani R., Perri A. G. Analytical electro thermal modeling of multi layer structure electronic devices, *The Open Electrical & Electronic Engineering Journal*, 2010, no. 4, pp. 32–39.
8. Epikhine E. N., Masal'sky N. V. K voprosu ucheta dielektricheskix svoystv kremnia pri sxemotexnicheskom modelirovani, *Trydi NIISI RAN*, 2015, vol. 5, no. 2, pp. 67–71 (in Russia).
9. Fiegna C., Yang Y., Sangiorgi E., O'Neill A. G. Analysis of self-heating effects in ultra thin body SOI MOSFETs by device simulation, *IEEE Trans. Electron. Devices*, 2008, vol. 55, no. 1, pp. 233–244.
10. Sze S. M. *Physics of semiconductor devices*. Part 1. A Wiley-Interscience Publication, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1981. 483 p.
11. Kozlov N. A., Nechaev A. M., Sinkevich V. F. Raschet stacionarnix teplovix polei v strukturax moshnix tranzistorov, *Elektronay tekhnika. Seria 2. Polyprovodnikovie pribori*, 1989, vol. 198, no. 1, pp. 19–24 (in Russia).
12. Shlixing G. *Teoria pogranchnogo sloa*. Moscow, Nauka, 1969, 744 p. (in Russia).
13. Dulnev G. N. *Teplo- i massoobmen b radioelektronnoi apparature*. Moscow: Vishay shkola, 1984. 247 p. (in Russia).
14. Patent H01L29/78/ (RU).
15. Volkov C. I. O pit razrabotki radiosionno-stoikix bibliotek b SBIS s primeneniem specializirovannoi SAPR. <http://www.myshared.ru/slide/467770/> (data access 2.03.2018).
16. Programnoe obespechenie dla rasshirennogo modelirovaniya teploperedachi. URL: <https://www.comsol.ru/heat-transfer-module>. (data access 17.02.2018).
17. TCAD Sentaurus Device. <https://www.synopsys.com/silicon/tcad/device-simulation/sentaurus-device.hlmt/> (data access 21.11.2017).
18. Watson J., Castro G. High temperature electronic pose design and reliability challenge. *Analog Dialog*. 2012. v. 46 <http://www.analog.com/> (data access: 22.08.2018).
19. Masal'sky N. V. Sintez xarakteristic logicheskix ventilee na dvux zatvornix sub-25 nanometrovix KNI KMOP-tranzistorax dla malomoshix, Nano- i microsystemnaya tekhnika, 2010, no. 5, pp. 41–46 (in Russia).
20. BSIMSOI3.1. MOSFET model user manual, University of California, Berkeley; 2003. <https://www.-devices.eecs.berkeley.edu/bsimsio.hlmt/> (data access 3.06.2018).
21. Compact Model Council. Online: <https://www.geia.org/CMC-Council/> (data access 17.06.2017).
22. Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis. URL: <https://www.stanford.edu/class/ee101b/hspice.html/> (data access 15.03.2017).

Н. Ф. Карушкин<sup>1</sup>, канд. техн. наук, И. А. Обухов<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,  
Е. А. Смирнова<sup>3</sup>, аспирант

<sup>1</sup> Государственное предприятие "Научно-исследовательский институт "Орион", г. Киев, Украина

<sup>2</sup> Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственная организация "Синергетика",  
115419, г. Москва, Россия, iao001@mail.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,  
elizaveta.a.smirnova@yandex.ru

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ СВЧ ДИАПАЗОНА. ЧАСТЬ I

Поступила в редакцию 05.10.2018

*Проанализирован уровень развития элементной базы электронной техники на основе полупроводниковых и волново-  
дущих электродинамических структур в коротковолновой части СВЧ диапазона. Рассмотрены особенности конструк-  
ций отдельных компонентов и устройств, таких как генераторы, усилители, умножители частоты, измерители мощ-  
ности, линии передачи и устройства для модуляции электромагнитных волн с использованием  $p-i-n$ -структур. Опи-  
саны практические применения компонентов и устройств в коротковолновой части СВЧ диапазона.*

**Ключевые слова:** терагерцовый диапазон, генераторы, детекторы, усилители,  $p-i-n$ -модуляторы, линии передачи,  
радиовидение, умножители частоты, модули СВЧ, РЛС, искусственный интеллект

### Введение

Коротковолновая часть СВЧ диапазона вклю-  
чает в себя электромагнитный спектр высокочас-  
тотных сигналов с длиной волны от 3 до 0,1 мм  
(100...1000 ГГц) и составляет основную часть тера-  
герцового диапазона за исключением дальней ИК  
области.

По сравнению с сантиметровым и дециметро-  
вым диапазонами рассматриваемые радиоволны  
можно назвать радиоволнами ближнего действия.  
Вследствие значительного поглощения в парах во-  
ды и кислороде дальность распространения сигна-  
лов при связи и локации существенно уменьшается  
и сильно зависит от метеорологических усло-  
вий. В диапазоне 500...750 ГГц существует область  
полос поглощения, где даже в минимумах затуха-  
ния (окнах прозрачности атмосферы) поглощение  
составляет сотни децибел на километр. По этим  
причинам особое место в исследованиях, исполь-  
зующих терагерцовый диапазон, занимает оборо-  
дование, устанавливаемое на космических аппа-  
ратах [1].

Хорошо известны технические трудности осво-  
ения коротковолновой части СВЧ диапазона [2—4].  
Здесь используются как СВЧ, так и оптические  
приборы и компоненты. Это область пересечения  
электроники и фотоники, которые отличаются те-  
оретической базой, техникой генерирования из-  
лучения, приемом и обработкой сигналов. Такой  
дуализм приводит к возможности использования  
в терагерцовом диапазоне гибридных устройств,  
построенных на смешении классических и кванто-  
во-механических принципов [3—5].

Освоение нового частотного диапазона всегда  
складывается из успехов по четырем основным на-  
учно-техническим направлениям [6—9]:

- генерация электромагнитных колебаний;
- прием электромагнитных волн;
- передача сигнала;
- управление параметрами электромагнитных ко-  
лебаний.

Состояние и перспективы этих направлений  
рассматриваются в настоящей работе.

## 1. Активные компоненты электронной техники

Интенсивное исследование и практическое освоение миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов началось с середины 50-х годов прошлого века. У истоков этих работ стоял председатель Научного совета АН СССР по проблеме "Методы генерирования, усиления, преобразования электромагнитных колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов" академик АН СССР и РАН Н. Д. Девятков. Под его руководством коллективами НПП "Исток" (Россия), ИПФ РАН (Россия), ИРЭ НАН (Украина) были созданы первые электровакуумные источники мощности субмиллиметрового диапазона волн, в том числе лампы обратной волны (ЛОВ). В таблице приведены основные характеристики широкодиапазонных ЛОВ, разработанных в НПП "Исток" [10, 11].

Рабочие частоты твердотельных приборов существенно ниже, чем обозначенные в двух правых столбцах таблицы. В отличие от вакуумных приборов движение носителей заряда в полупроводниках сопровождается их рассеянием, рекомбинацией и генерацией. Этим явлениям соответствуют характерные времена, которые ограничивают предельные частоты функционирования полупроводниковых приборов.

Одним из таких ограничивающих факторов является характерное время пролета носителей заряда через области дрейфа твердотельных генераторов и усилителей. При этом зависимость предельных рабочих частот приборов от характеристик материала оказывается неоднозначной. Несмотря на то, что в генерирующих диодах, выполненных на основе арсенида галлия, скорость электронов больше чем в кремнии, они имеют преимущество перед кремниевыми лишь до частот ~60 ГГц. Наибольшие частоты генерации лавинно-пролетными диодами

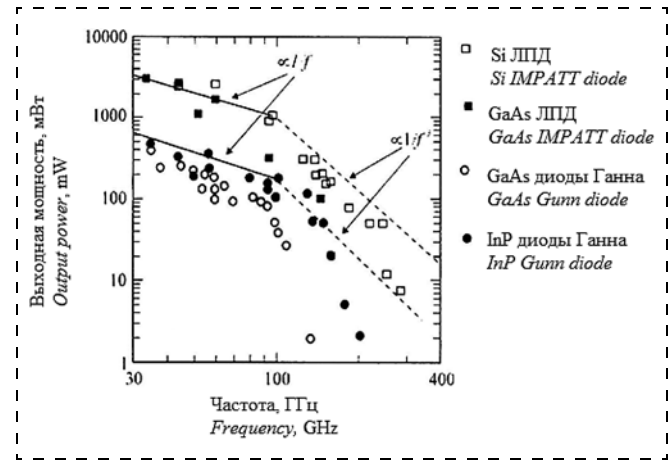


Рис. 1. Частотная зависимость выходной мощности диодных структур, работающих в непрерывном режиме

Fig. 1. Frequency dependence of the output power of the diode structures working in a continuous mode

(ЛПД) [12, 13] достигнуты на кремниевых многослойных структурах со специальным профилем легирования. По-видимому дальнейший прогресс в этой области следует ожидать при совершенствовании технологии ЛПД на основе широкозонных полупроводников, таких как нитрид галлия [14].

Рассеяние носителей заряда в твердотельных структурах помимо ограничения дрейфовой скорости приводит к выделению теплоты. Поскольку КПД полупроводниковых приборов в рассматриваемом диапазоне частот невелик (2...5%), а теплопроводность полупроводников ограничена, проблема обеспечения теплостойкости является очень важным фактором, ограничивающим выходную мощность усилителей и генераторов.

На рис. 1 приведена частотная зависимость выходной мощности различных полупроводниковых диодных генерирующих структур, работающих в

### Основные характеристики широкодиапазонных ЛОВ

Basic characteristics of the wide-range BWT

Тип ЛОВ Type of BWT	ОВ-86 OV-86	ОВ-1 OV-1	ОВ-30 OV-30	ОВ-32 OV-32	ОВ-80 OV-80
Рабочий диапазон, ГГц Working range, GHz	118...178	177...260	258...375	370...530	580...700
Выходная мощность, мВт Output power, mW	6...20	6...15	1...10	1...5	1...5
Рабочее напряжение, кВ Working voltage, kW	0,5...1,5	0,7...1,9	1...4	1...4,5	1,5...6
Ток катода, мА Cathode current, mA	25	25	25...40	25...40	30...45
Напряжение сетки, В Grid voltage, V	200	200			
Ток сетки, А Grid current, A	-0,3	-0,3			
Фокусирующее магнитное поле, Э Focusing magnetic field, Oe			7000	9000	10 000
Масса, кг Mass, kg	1,0	1,8	0,3	0,3	0,3



непрерывном режиме [14]. Видно, что, несмотря на некоторые отличия в ходе кривых для различных структур и материалов, общая тенденция быстрого уменьшения выходной мощности с увеличением частоты является единой.

Один из способов создания источников мощности в субмиллиметровом диапазоне основан на применении ЛПД в режиме эффективного преобразования частоты высокостабильного низкочастотного сигнала [15, 16]. Этот способ обеспечивает уровень мощности выходного сигнала на  $n$ -й гармонике  $P_{\text{вых}} \approx 1/n$ , что существенно превосходит достижимые характеристики умножителей на диодах с накоплением заряда, для которых  $P_{\text{вых}} \approx 1/n^2$ .

Теоретическое рассмотрение характеристик умножителя частоты на ЛПД основано на схеме включения в СВЧ цепь генератора и подведения к ЛПД напряжения вида

$$U(t) = U_0 + U_m \sin(\omega t).$$

В результате действия опорного напряжения с частотой  $\omega$  при достаточно большой амплитуде  $U_m$  в высокочастотной цепи в течение временных интервалов проходят импульсы высокой частоты  $\omega_0$ , лежащей в рабочей полосе частот генератора. При определенных условиях происходит фазовая синхронизация высокочастотных колебаний  $n$ -й гармоники опорного сигнала, в результате чего возникает последовательность когерентных СВЧ сигналов с частотой  $\omega_0 = n\omega$ . Как правило, в режиме самовозбуждения генератора на ЛПД (ГЛПД) синхронизация наблюдается только в узкой полосе частот. В режиме усиления на отрицательном сопротивлении ЛПД синхронизация наблюдается в достаточно широком интервале изменений частоты опорного сигнала умножителя [17].

Проведенные коллективом специалистов НИИ "Орион" (Киев, Украина) исследования экспериментальных образцов, выполненных на основе многослойных кремниевых лавинно-пролетных структур с отрицательной проводимостью и использованием радиоимпульсного преобразования частоты, показали возможность реализации источников электромагнитного излучения в диапазоне частот 100...150 ГГц с выходной мощностью 10...30 мВт в режиме генерации [18]. Это позволило провести разработку активных преобразователей частоты высокой кратности на ЛПД непрерывного и импульсного действия и эффективно применить их при создании приемопередающих компонентов различного назначения в этом диапазоне частот [19, 20].

Несмотря на потенциальные возможности работы ЛПД на очень высоких частотах, существует целый ряд конструктивных факторов, эти возможности ограничивающих. Одно из основных ограничений связано со значением последовательного

сопротивления растекания подложки и сопротивлением контактов. С увеличением частоты удельное отрицательное сопротивление активного слоя ЛПД падает, и частота, на которой сопротивление растекания становится равным отрицательному сопротивлению, становится предельной для данного диода.

Особое внимание при разработке полупроводниковых источников в коротковолновой части СВЧ диапазона следует обращать на тепловые режимы работы активного элемента, поскольку перегрев  $p$ - $n$ -перехода не позволяет получить для данного диапазона необходимое значение плотности тока. Поэтому при определенных условиях глубокое охлаждение ГЛПД может коренным образом изменить параметры активных элементов.

При низких температурах одно из основных ограничений, связанное с допустимой мощностью рассеяния на  $p$ - $n$ -переходе, становится менее существенным, так как мощность рассеяния, отводимая от  $p$ - $n$ -перехода, возрастает при уменьшении температуры корпуса в соответствии с простой формулой:

$$P_{\text{отв}} = \frac{T_{pn} - T_{cp}}{R_T},$$

где  $T_{pn}$  — температура  $p$ - $n$ -перехода при рабочем токе;  $T_{cp}$  — температура корпуса диода при охлаждении;  $R_T$  — тепловое сопротивление между  $p$ - $n$ -переходом и теплоотводом.

Мощность генераторов на ЛПД, созданных в диапазоне частот 160...170 ГГц, при охлаждении до температуры 700 К увеличивается примерно в 5 раз по сравнению со значением мощности при комнатной температуре и составляет 40...50 мВт.

Исследования показывают, что у охлажденного генератора приращение выходной мощности при увеличении тока питания более высокое, чем у работающего при комнатной температуре. Выходная мощность на второй гармонике ( $f_0 = 312$  ГГц) генератора при охлаждении также увеличивается примерно в 4—5 раз и составляет 1,2...2 мВт. Это качество в сочетании с температурной стабильностью ГЛПД при низких температурах расширяет границы применения полупроводниковых генераторов в терагерцовом диапазоне [21].

Важной причиной, ограничивающей выходную мощность ГЛПД на высоких частотах, является трудность согласования очень малого импеданса диода с импедансом внешней электродинамической конструкции. Обеспечение высоких коэффициентов трансформации импеданса диода при включении его в цепь СВЧ является основной особенностью создания высокочастотных генераторно-преобразовательных и усилительных устройств на ЛПД с минимальными энергетическими потерями.

Применение режима внешней синхронизации полупроводниковых генераторов решает задачу построения выходных каскадов передатчика с высоким коэффициентом усиления, низким уровнем частотного шума и уровнем выходной мощности, соответствующим максимальному энергетическому режиму. Уровень частотного шума и стабильность частоты выходного сигнала определяются параметрами синхронизирующего сигнала. Это обстоятельство позволяет создавать высокостабильные источники с минимальными фазовыми шумами в коротковолновой части миллиметрового диапазона, где построение высокочастотных резонаторов весьма затруднено. Режим синхронизации во многих случаях предпочтительнее режима пассивного усиления.

Серьезным достоинством синхронизированных усилителей на ЛПД является возможность более полного использования в автоколебательном режиме энергетического потенциала активного элемента и ряд других преимуществ, таких как слабая зависимость мощности выходного сигнала от уровня входного, простота схемы и конструкции вследствие отсутствия необходимости обеспечения устойчивости к самовозбуждению, меньшая чувствительность к изменениям температуры. Синхронизированные усилители на ЛПД имеют большие выходные мощности [17, 20, 22, 23].

Успехи в технологии гетеробарьерных структур, а также освоение широкозонных полупроводников уже в ближайшее время могут внести существенные изменения в распределение областей применения между различными типами приборов. Однако использование двухэлектродных приборов, таких как лавинно-пролетный диод и резонансно-туннельный диод (РТД) будет, по-видимому, оправданным и в будущем. Это обусловлено резким уменьшением выходной мощности транзисторных усилителей и генераторов на частотах выше 100 ГГц. Кроме того, диодные структуры лучше совмещаются с волноведущими трактами.

Малый уровень мощности может компенсироваться за счет сложения мощности от нескольких источников в квазиоптических электродинамических конструкциях. По аналогичным причинам практический интерес представляют и умножители частоты на диодах с барьером Шоттки, работающие как в варисторном, так и в варакторном режимах, а также высокоэффективные умножители частоты на диодах с объемной отрицательной проводимостью.

На протяжении последних десятилетий повышение функциональной сложности и быстродействия систем достигалось за счет увеличения плотности размещения и уменьшения размеров элементов, принцип действия которых не зависит от их масштаба. При переходе к размерам элементов

порядка десятков или единиц нанометров возникает качественно новая ситуация, при которой квантовые эффекты (туннелирование, размерное квантование, интерференция электронных волн) оказывают определяющее влияние на физические процессы в наноструктурах и функционирование электронных приборов на их основе [24—30].

Мы полагаем, что дальнейшее развитие твердотельных приборов и устройств терагерцовой электроники с неизбежностью связано с развитием нанотехнологий. Их применение уже сейчас позволяет существенным образом улучшить характеристики традиционных СВЧ транзисторов и позволит в будущем создать новые приборы, основанные на квантовых эффектах [28—33].

## 2. Детекторы и приемники сигналов

Для приема и детектирования в терагерцовом диапазоне традиционно находят широкое применение болометры, диоды с барьером Шоттки и безбарьерные диоды Мота [34—39]. Широкую номенклатуру волноводных детекторов на диодах Шоттки с нулевым смещением изготавливает компания *Virginia Diodes Inc.*, США [6].

В работе [34] предложен КРТ-болометр на эффекте разогрева электронного газа, который можно использовать для детектирования терагерцового и миллиметрового излучения. Оцененная эквивалентная шумовая мощность детектора сравнима по значению шумовой эквивалентной мощности (NEP) с другими известными неохлаждаемыми терагерцовыми приемниками и составляет при комнатной температуре и нулевом смещении  $5 \cdot 10^{-9}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>, а при  $T = 770$  К —  $8 \cdot 10^{-16}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>. Проведен расчет распределения поля, наведенного планарной антенной в системе антенна — детектирующий элемент. Показано, что планарная бабочкообразная антенна может усилить интенсивность поля в чувствительном элементе на пять порядков по сравнению с полем падающей волны.

В ЗАО "Сверхпроводниковые нанотехнологии" (Россия) созданы приемники (болометры) в диапазоне 0,3...70,0 ТГц на основе сверхпроводящих наноструктур, работающих на эффекте электронного разогрева [35]. Типичная шумовая эквивалентная мощность NEP  $\approx 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> достигается охлаждением приемника до 0,25...0,3 К.

В Институте физики микроструктур РАН (Россия) уже длительное время исследуются характеристики низкобарьерных структур типа металл—изолятор—металл (MIM) и металл—полупроводник—металл (MSM), а также возможности их применения для детектирования терагерцового излучения и радиовидения [36—38]. Показано, что на таком типе структур могут быть при комнатной температуре получены значения NEP, мень-

шие  $10^{-12}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>, или соответствующие им значения эквивалентной шуму разности температур до 0,03 К/Гц<sup>1/2</sup>.

В настоящее время на зарубежных рынках представлены различные болометры терагерцового диапазона [39]. Сверхпроводящие туннельные переходы типа SIS могут непосредственно конвертировать субмиллиметровые фотоны в электрический ток, причем выходная эффективность приближается к пределу один электрон на один фотон. Этот эффект широко применяется для смесителей, гетеродинов, но может использоваться и для прямого детектирования.

Представляет интерес применение пьроэлектрических приемников для детектирования и обнаружения излучения в терагерцовом диапазоне [40]. Такие приемники неселективны в частотном диапазоне и имеют пороговую чувствительность  $10^{-8} \dots 10^{-9}$  Вт/Гц<sup>-1/2</sup>. Пьроэлектрический эффект находит широкое применение при создании приемников теплового излучения и для регистрации малых и средних перепадов температуры.

В качестве чувствительных элементов используют линейные пьроэлектрики, обладающие необратимой поляризацией, и сегнетоэлектрики, характеризующиеся реверсной спонтанной поляризацией. Более широкое распространение получили сегнетоэлектрики ввиду больших значений пьроэлектрического коэффициента. Чувствительность широкополосных тепловых индикаторов (детекторов) электромагнитного излучения, использующих пьроэлектрический эффект, такая же как у лучших образцов болометров, работающих при комнатной температуре, и оптико-акустических приемников, но последние имеют значительно меньшую постоянную времени.

Пьроэлектрические индикаторы можно использовать для измерения абсолютных значений уровней потоков электромагнитного излучения [41, 42]. В работе [41] описан один из вариантов измерителя мощности терагерцового диапазона. Чувствительные элементы пьроэлектрических индикаторов СВЧ мощности выполняют в виде плоскопараллельных пластинок, на стороны которых нанесены металлические контакты с заданным сопротивлением. Одна из сторон пьроэлектрического элемента является приемником излучения оптического диапазона, другая сторона — приемником СВЧ излучения, что позволяет обеспечить возможность абсолютных измерений мощности СВЧ в широком динамическом диапазоне при высокой чувствительности и малой инерционности устройства.

На рис. 2 представлена одна из возможных конструкций измерителя.

Чувствительный пьроэлектрический элемент 1 расположен в волноводе 2. Верхний контакт чувствительного элемента 1 соединен с усилителем 5.

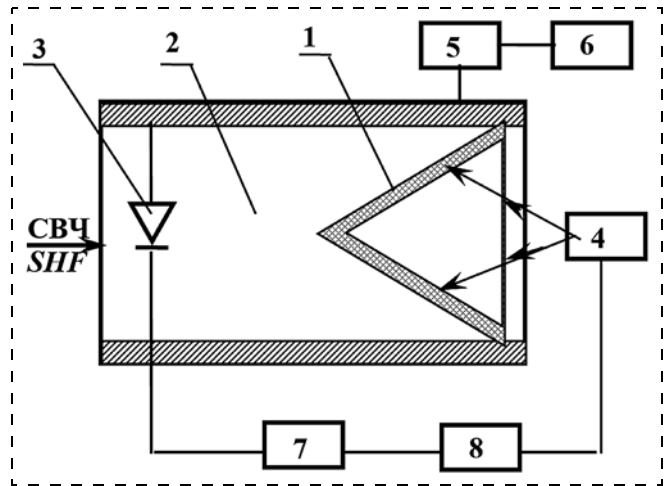


Рис. 2. Схема конструкции пьроэлектрического измерителя мощности

Fig. 2. Circuit of a pyroelectric power measuring instrument

Сигнал регистрируется индикатором 6, второй вывод заземляется. Оптическое излучение от источника 4 падает на внутреннюю часть пьроэлектрического клина или конуса ИЭ 1, генератор 7 и синхронизатор 8 обеспечивают режимы импульсной работы модуляторов СВЧ и оптического излучения.

Измеритель мощности СВЧ работает на сравнении сигналов двух мощностей. Измеряемая мощность СВЧ и мощность излучения оптического диапазона практически полностью поглощаются противоположными поверхностями пьроэлектрического приемника. Потоки от двух источников генерируют пропорциональные их мощности пьроэлектрические токи, сдвинутые по фазе на 180°. Результирующий сигнал равен нулю при равенстве исследуемого потока и потока сравнения, при этом измерительная схема выполняет роль индикатора баланса — от ее чувствительности зависит чувствительность измерителя. Точность измерения определяется коэффициентом поглощения мощности СВЧ и мощности излучения оптического диапазона, которые близки к единице, а также точностью калибровки источника сравнения, которая проводится по стандартному черному телу.

В настоящее время развивается направление по созданию приемных систем радиовидения. В основе этого направления лежит идея построения и использования так называемых матричных приемников: решеток линейных или квадратных, составленных из отдельных приемных модулей и содержащих на своем общем выходе информацию о форме источника излучения. В общем виде процесс получения информации может рассматриваться как процесс измерения уровней излучения этого источника, приходящих с разных направлений, с последующим синтезом получающейся картины. При этом возможны два варианта реализации такого процесса.

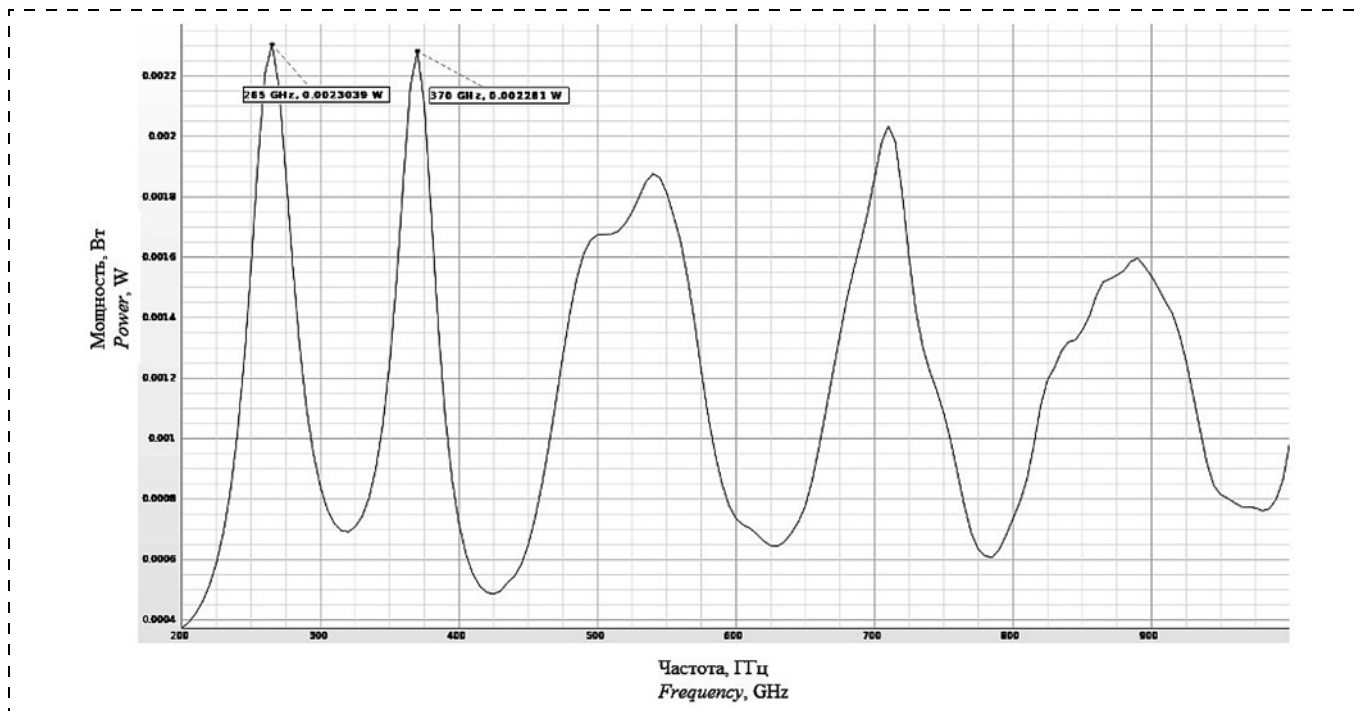


Рис. 3. Расчетная зависимость принимаемой мощности от частоты для матрицы из четырех круглых золотых контактов диаметром 40 мкм к нанопроводам InSb

Fig. 3. Calculated dependence of the received power on frequency for a matrix of four round gold contacts with diameter of 40  $\mu\text{m}$  to nanowires of InSb

В первом варианте используется один приемник, который последовательно выдает на выход информацию об уровне излучения, принимаемого в результате качания в пределах некоторого угла всей антенны вместе с приемником либо в результате перемещения самого приемника в фокальной плоскости неподвижной антенны.

Во втором варианте используется линейная матрица или квадратная решетка, составленная из некоторого числа отдельных приемных модулей. Каждый из модулей выдает на общий выход информацию об уровне излучения, принимаемого им со своего направления.

Главным достоинством второго варианта является более высокое быстродействие и длительное время накопления сигнала, что позволяет существенно повысить чувствительность приемной системы. Высокое быстродействие позволяет использовать такие матричные системы радиовидения для наблюдения за источниками излучения с быстроменяющимися очертаниями. Высокая чувствительность позволяет использовать эти системы в радиоастрономии для наблюдения за очень удаленными космическими источниками излучения.

Сама идея преобразования радиорельефа в видимое изображение не нова, однако терагерцовый диапазон оказался очень перспективным для ее реализации. С одной стороны, современные радиотехнические средства обеспечивают высокую чувствительность приема электромагнитных сигналов, а с другой стороны, с уменьшением длины волны

удается реализовать матричные приемные конструкции в очень компактном виде при сохранении достаточно высокого углового разрешения [3].

Активные системы радиовидения, использующие подсветку, можно применять как для создания изображения, так и для терагерцовой спектроскопии. На частотах выше 500 ГГц проникающая способность излучения снижается и совмещение радиовидения со спектроскопией усложняется. Основной проблемой, затрудняющей развитие систем радиовидения в коротковолновом участке электромагнитного спектра терагерцового диапазона, является доступность источников и детекторов. В диапазоне до 200 ГГц источники излучения и высококачественные детекторы позволяют создать системы, которые могут конкурировать с рентгеновскими системами обратного рассеяния по качеству изображения и стоимости. Более высокочастотные источники и приемники излучения, которые позволяют осуществить электрокопию материалов, пока еще дороги. Ряд европейских фирм, а также ИФМ РАН (Россия) (см. работы [38, 43]) проводят работы по созданию матриц детекторов терагерцового диапазона, подобных тепловизионным неохлаждаемым матрицам. Появление таких матриц, несомненно, сделает системы терагерцового радиовидения более доступными для применения.

В будущем в детектировании терагерцового излучения также как и в его генерации важную роль могут сыграть нанотехнологии. Из представленных

в работах [28, 29] расчетов и результатов измерений [44] следует, что удельная емкость перехода между нанопроводом из антимонида индия, сформированным в матрице анодного оксида алюминия, и золотым контактом составляет единицы нанофарад на сантиметр в квадрате ( $\text{nF}/\text{cm}^2$ ). Простые оценки показывают, что при такой емкости золотой контакт площадью около  $100 \text{ мкм}^2$ , под которым находится "жгут", содержащий несколько десятков тысяч нанопроводов, будет представлять собой антенну терагерцового диапазона.

На рис. 3 показана расчетная зависимость от частоты мощности, принимаемой матрицей из четырех таких круглых антенных элементов с диаметром  $40 \text{ мкм}$ , центры которых размещены в вершинах квадрата со стороной  $100 \text{ мкм}$ . Расчетная излучательная эффективность такой антенны оказывается выше  $90 \%$ .

#### Список литературы

1. **Fifth International Symposium on Space Terahertz Technology** // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique. 1995. Vol. 43, Issue 4. P. 921–994. DOI: 10.1109/22.375254
2. **Майская В.** Освоение терагерцовой щели. Полупроводниковые приборы вторгаются в субмиллиметровый диапазон // Электроника: НТБ. 2011. № 8. С. 74–87.
3. **Еру И. И.** Терагерцовая техника и технология: современное состояние, тенденции развития и перспективы практического применения // Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 3. С. 51–79.
4. **Исаев В. М., Кабанов И. Н., Комаров В. В., Мещанов В. М.** Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона // Доклады ТУСУТа. 2014. № 4 (34). С. 5–21.
5. **Карушкин Н. Ф.** Возможности применения терагерцового диапазона радиоволн // Материалы 5-й Международной конференции и 3-й Международной студенческой конференции "Проблемы телекоммуникации". НТУУ КПИ. 2011. С. 23–27.
6. **Алавердян С. А., Боков С. И., Булгаков В. О., Зайцев Н. А.** и др. Терагерцовый диапазон частот: Электронная компонентная база. Вопросы метрологического обеспечения // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. М.: ЦНИИ "Электроника", 2012. 74 с.
7. **Пожидаев В. Н.** Возможности применения терагерцового диапазона радиоволн // Радиотехника. 2008. № 5. С. 5–8.
8. **Chattopadhyay G.** Technology, Capability and Performance of Low Power Terahertz Sources // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2011. Vol. 1, Is. 1. P. 33–53. DOI: 10.1109/THZ.2011.2159561
9. **Schlecht E., Maiwald F., Chattopadhyay G., Martin S., Mehdi I.** Design considerations for heavily — doped cryogenic Schottky diode varactor multipliers // Proceedings of the 12th International Symposium on Space Terahertz Technology. San Diego. USA. 2001. P. 485–494.
10. **Гершензон Е. М., Голант М. Б., Негирев А. А., Савельев В. С.** Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / Под ред. Н. Д. Девяткова. М.: Радио и связь, 1985. 135 с.
11. **НПП "Исток"**; Россия. URL: <http://www.istokmw.ru/vakuumnie-generatori-maloy-moshnosti/>
12. **Тагер А. С.** Лавинно-пролетный диод и его применение в технике СВЧ // Успехи физических наук. 1966. Т. 90, вып. 4. С. 631–666.
13. **Тагер А. С., Вальд-Перлов В. М.** Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. М.: Советское радио, 1968. 480 с.
14. **Любченко В. Е.** Фундаментальные ограничения и перспективы применения полупроводниковых приборов в радиосистемах миллиметрового диапазона волн // Радиотехника. 2002. № 2. С. 16–27.
15. **Дворниченко В. П., Карушкин Н. Ф., Мальцев С. Б., Чайка В. Е.** Работа ЛПД в режиме радиоимпульсного умножения частоты // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1985. Вып. 4 (386). С. 40–41.
16. **Карушкин Н. Ф., Обухов И. А., Балабанов В. М., Смирнова Е. А.** Твердотельные модули для генерации СВЧ излучения в диапазоне частот до  $200 \text{ ГГц}$  // Материалы 26-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2016). 2016. с. 289–295.
17. **Карушкин Н. Ф.** Фазовая синхронизация в мощных импульсных приборах СВЧ // Материалы 26-й Международной Крымской конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2016), 2016. С. 1712–715.
18. **Web-сайт ГП "НИИ "Орион"**: [www.orion.org.ua](http://www.orion.org.ua). Киев, Украина.
19. **Карушкин Н. Ф., Мальцев С. Б., Хитровский В. А.** Твердотельные СВЧ модули для радиотехнической аппаратуры и систем миллиметрового диапазона длин волн // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2016. № 1. С. 3–7.
20. **Касаткин Л. В., Чайка В. Е.** Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. Севастополь: Вебер, 2006. 319 с.
21. **Балабанов В. М., Карушкин Н. Ф., Обухов И. А., Смирнова Е. А.** Источники СВЧ мощности на лавинно-пролетных диодах в коротковолновой части миллиметрового диапазона // Материалы 27-й Международной Крымской конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2017). 2017.
22. **Дворниченко В. П., Карушкин Н. Ф., Мальшко В. В., Ореховский В. А.** Полупроводниковый генератор импульсного действия с электронным переключением частоты Кадиапазона // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2015. № 4. С. 3–7.
23. **Карушкин Н. Ф.** Использование кольцевых структур ЛПД для увеличения средней импульсной мощности генераторов миллиметрового диапазона // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 2010. Вып. 4 (507). С. 46–54.
24. **Асеев А. Л.** Нанотехнологии в полупроводниковой электронике // Вестник Российской академии наук. 2006. Т. 76, № 7. С. 603–611.
25. **Обухов И. А.** Некоторые проблемы современной наноэлектроники // Материалы 15-й Международной Крымской конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии". 2005. С. 5–7.
26. **Гончарук Н. М., Карушкин Н. Ф.** Нитрид-галлиевый резонансно-туннельный диод // Труды 19-й Международной конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо). 2009. С. 671–674.
27. **Гончарук Н. М., Карушкин Н. Ф.** Резонансно-эмиссионный диод на нитрид-галлиевом катоде с однослойным катодным покрытием // Материалы 24-й Международной Крымской конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2014). 2014. С. 817–818.
28. **Обухов И. А., Смирнова Е. А.** Нанопровод как активный элемент генератора СВЧ излучения // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. № 8. С. 509–517.
29. **Обухов И. А., Горох Г. Г., Лозовенко А. А., Смирнова Е. А.** Матрицы нанопроводов из антимонида индия и их применения для генерации СВЧ излучения // Наноиндустрия. 2017. № 7 (77). С. 96–108.

30. **Гончарук Н. М., Карушкин Н. Ф.** Нитрид-галлиевый диод Ганна миллиметрового диапазона // Материалы 22-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2012). 2012. С. 161—162.
31. **Goncharuk N. M., Karushkin N. F., Malyshko V. V., Orehovskiy V. A.** Terahertz Diode on Gallium Nitride Microcathode // The Eighth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'13) and Workshop on Terahertz Technology (Teratech'13). Kharkov, Ukraine. June 23—28, 2013. P. 85—87.
32. **Goncharuk N. M., Karushkin N. F., Malyshko V. V., Orehovskiy V. A.** Submillimeter diode on gallium arsenide nanostructure // The Eighth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'13) and Workshop on Terahertz Technology (Teratech'13), Kharkov, Ukraine, June 23—28, 2013. pp. 121—123.
33. **Goncharuk N. M., Karushkin N. F., Malyshko V. V., Orehovskiy V. A.** Gallium nitride diode with tunnel injection // Journal of Radio physics and Electronics. 2013. Vol. 4 (18), № 3. P. 69—78.
34. **Сизов Ф. Ф., Апанская М. В., Гуменок-Сычевская Ж. В.** и др. Многоэлементные приемники терагерцового диапазона на CdHgTe // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 61—66.
35. **Смирнов К. В., Вахтомин Ю. Б.** и др. Приемники инфракрасного и терагерцового излучения на основе сверхпроводниковых наноструктур // Материалы 20-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2010). 2010.
36. **Шашкин В. И., Вакс В. Л., Данильцев В. М.** и др. Микроволновые детекторы на основе низкобарьерных планарных диодов Шоттки и их характеристики // Известия вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 6. С. 544—551.
37. **Шашкин В. И., Мурель А. В.** Диагностика микроволновых низкобарьерных детекторных диодов // Материалы 17-й Международной Крымской конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2007). 2007. С. 587—588.
38. **Востоков Н. В., Королев С. А., Шашкин В. И.** Применение низкобарьерных структур металл—полупроводник—металл для детектирования микроволновых сигналов // Журнал технической физики. 2014. Т. 84, вып. 7. С. 91—95.
39. **Terahertz Hot Electron Bolometer Detectors from 0.3 to 70 THz** // Insight Product Co. 2011. URL: <http://www.insight-product.com/detect3.htm>
40. **Dooley D.** Sensitivity of broadband pyroelectric terahertz detectors continues to improve // Laser Focus World. 2010. Vol. 46. P. 42—56.
41. **А. с. 263697** СССР, МПК G01r 21/04. Измеритель мощности СВЧ / Л. Г. Гасанов, Н. Ф. Карушкин, Л. С. Кременчугский, П. И. Яшишин. № 1250575/26-9; заявл. 25.06.68; опубл. 10.11.70. Бюл. № 8.
42. **Свич В. А., Дюбко С. Ф., Кузьмичев В. М., Валитов Р. А.** Пирозлектрический индикатор субмиллиметрового диапазона // Электронная техника. Сер. 11: Контрольно-измерительная аппаратура. 1968. Вып. 1. С. 67—75.
43. **Шашкин В. И., Дрягин Ю. А., Закамов В. Р.** и др. Планарные детекторы для многоэлементных систем радиовидения миллиметрового диапазона длин волн // Известия вузов. Радиофизика. 2007. Т. 51, № 12. С. 1077—1087.
44. **Божьев И. В., Горох Г. Г., Карушкин Н. Ф.** и др. Электрические характеристики нанопроводов антимионида индия в пористых матрицах анодного оксида алюминия // Материалы 28-й Международной Крымской конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2018). 2018. С. 1041—1046.

**N. F. Karushkin**, Ph. D., Academician of the Academy of Sciences of the ERA, State Enterprise "Research Institute "Orion", Kiev-57, 03680, Ukraine,

**I. A. Obukhov**, D. Sc., Senior Research Officer, LLC Research and Production Organization "Sinergetika", Moscow, 115419, Russian Federation, [iao001@mail.ru](mailto:iao001@mail.ru)

**E. A. Smirnova**, Postgraduate, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation, [elizaveta.a.smirnova@yandex.ru](mailto:elizaveta.a.smirnova@yandex.ru)

*Corresponding author:*

**Smirnova Elizaveta A.**, Postgraduate, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov, Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation, [elizaveta.a.smirnova@yandex.ru](mailto:elizaveta.a.smirnova@yandex.ru)

## Semiconductor Components and Electronic Technology Devices in the Short Wave Section of the Microwave Radiation. Part I

*Received on October 5, 2018  
Accepted on November 14, 2018*

*The level of development of the elemental base of electronic equipment based on semiconductor and waveguide electrodynamic structures in the shortwave part of the microwave range are analyzed. One of the main problems arising in the implementation of the terahertz range is associated with the need to provide the advanced equipment developed in this frequency band with effective electronic components... This paper provides a comparative analysis of the characteristics of the terahertz range components, based on the solid-state elements and waveguide electrodynamic structures. The features of design solutions in the process of creating semiconductor components and devices, such as oscillators, amplifiers, frequency multipliers, power meters, transmission lines, and devices for modulating electromagnetic waves using  $p-i-n$  structures, are shown. The main directions of the practical application of apparatus and equipment of the terahertz range are considered. The attractiveness of the terahertz range to create high-speed communication systems, high-resolution radar, radio vision systems, remote identification devices of substances, and other special and civil engineering, is shown.*

**Keywords:** terahertz range, generators, detectors, amplifiers,  $p-i-n$  modulators, transmission lines, radio vision, frequency multipliers, microwave modules, radar, artificial intelligence

For citation:

Karushkin N. F., Obukhov I. A., Smirnova E. A. Semiconductor Components and Electronic Technology Devices in the Short Wave Section of the Microwave Radiation. Part I., *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 165–177.

DOI: 10.17587/nmst.21.165-177

## Introduction

The short-wave section of the microwave range includes the electromagnetic spectrum of high-frequency signals with the wavelengths from 3 down to 0.1 mm (100...1000 GHz) and makes the basic part of the terahertz range except for the distant IR area.

In comparison with the centimeter and decimeter ranges, the considered radio-waves can be called radio-waves of the short-range. Because of a considerable absorption in the flows of water and in oxygen the range of propagation of signals during communication and location decreases essentially and depends strongly on the meteorological conditions. In the range of 500...750 GHz there is an area of absorption strips, where even in the attenuation minima (windows of the atmosphere transparency) the absorption equals to hundreds of decibels per a kilometer. Due to these reasons, in the research works employing the terahertz range of special importance is the equipment installed in the space vehicles [1].

The technical problems of development of the short-wave section of the microwave range are well-known [2–4]. Here, both the optical devices, and the components and the microwave devices are used. This is the area of overlapping of electronics and photonics, which have different theoretical bases, methods of generation of radiation, reception and processing of signals. Such a dualism provides opportunities in the terahertz range for using of the hybrid devices built on combination of the classical and quantum-mechanical principles [3–5].

Mastering of a new frequency range is always a sum-total of the success achieved in four basic scientific and technological directions [6–9]:

- generation of the electromagnetic oscillations;
- reception of the electromagnetic waves;
- signal transmission;
- control of parameters of the electromagnetic oscillations.

The present state and prospects of these directions are considered in the given article.

## Active components of the electronic technology

An intensive research and practical development of the millimeter and submillimeter ranges began in the mid-1950s. At the sources of those works was Deviatkov, Academician of AS of the USSR and Russian Academy of Sciences, Chairman of the Scientific Council of the USSR Academy of Sciences, who worked on "Methods for generation, amplifying and transformation of the electromagnetic oscillations of the millimeter and submillimeter ranges".

Under his guidance the researchers from NPP Istok (Russia), IPF RAS (Russia), IRE NAS (Ukraine) developed the first electrovacuum sources of power of the submillimeter range, including the backward-wave tubes (BWT). The table

presents the basic characteristics of the wide-range BWT developed by NPP ISTOK [10, 11].

The working frequencies of the solid-state devices are essentially lower, than the ones presented in two right columns of Table 1. Unlike in vacuum devices, movement of the charge carriers in the semiconductors is accompanied by their scattering, recombination and generation. The characteristic times, which restrain the limiting frequencies of the functioning of the semi-conductor devices, correspond to these phenomena.

One of such limiting factors is the characteristic time of the flight of the charge carriers through the areas of drift of the solid-state generators and amplifiers. At that, the dependence of the limiting working frequencies of the devices on the material characteristics appears to be ambiguous. Despite the fact that in the generating diodes, made on the basis of gallium arsenide, the speed of the electrons is higher than in silicon, they have an advantage in comparison with silicon only at frequencies below ~60 GHz. The greatest frequencies of generation [12, 13] were reached by the impact avalanche-transit time diodes (IMPATT diodes) on the silicon multilayered structures with a special alloying profile. Apparently, the further progress in this area should be expected due to perfection of the IMPATT diode technology on the basis of wide-band-gap semiconductors, such as gallium nitride [14].

Besides restriction of the drift speed, scattering of the charge carriers in the solid-state structures leads to a heat release. Since the efficiency of the semi-conductor devices in the considered range of frequencies is not big (2–5 %), while the heat conductivity of the semiconductors is limited, the problem of maintenance of the temperature constancy is a very important factor limiting the output power of the amplifiers and generators.

Fig. 1 presents the frequency dependence of the output power of various semi-conductor diode generating structures working in a continuous mode [14]. It is visible, that, despite certain differences in the curves for various structures and materials, the general trend for a rapid reduction of the output power with an increase of the frequency is uniform.

One of the ways for the development of the power sources in the submillimeter range is based on the application of IMPATT diodes in the mode of effective transformation of the frequency of a highly stable low-frequency signal [15, 16]. This method ensures the level of the output signal power on the  $n$ -th harmonic of  $P_{\text{out}} \sim 1/n$ , which surpasses considerably the characteristics achievable by the multipliers on the diodes with a charge accumulation, for which  $P_{\text{out}} \sim 1/n^2$ .

The theoretical consideration of the characteristics of a frequency multiplier on IMPATT diodes is based on inclusion into the microwave circuit of a generator and supply to IMPATT diodes of the voltage of the following kind:

$$U(t) = U_0 + U_m \sin(\omega t).$$

As a result of action of the reference voltage with frequency  $\omega$  at a rather big amplitude  $U_m$  in a high-frequency circuit during the time intervals, pulses appear of high frequency  $\omega_0$  laying in the working strip of the frequencies of the generator. Under certain conditions, a phase synchronization of the high-frequency oscillations of the  $n$ -th harmonic of the reference signal occurs, which results in a sequence of coherent microwave signals with the frequency of  $\omega_0 = n\omega$ . As a rule, in the mode of self-excitation of the generator on the IMPATT diodes (GIMPATT diodes) the synchronization is observed only in a narrow strip of frequencies. In the amplifying mode on the negative resistance of the IMPATT diodes the synchronization is observed in a rather wide interval of the frequency variations of the multiplier reference signal [17].

The research of the experimental samples, done by a group of experts from Orion Research Institute (Kiev, Ukraine) on the basis of the multilayered silicon avalanche transit-time structures with the negative conductivity and using of radio pulse transformation of frequency, demonstrated a possibility of the realization of the electromagnetic radiation sources in the range of frequencies of 100...150 GHz with the output power of 10...30 mW in the generation mode [18]. This allowed us to develop active converters of high frequency rates on the avalanche transit-time diodes of continuous and pulse action, and apply them effectively for development of different-purpose transmitting-receiving components in this range of frequencies [19, 20].

Despite the potential opportunities for operation of the IMPATT diodes on very high frequencies, there are many design factors, which limit these opportunities. One of the basic restrictions is connected with the value of the consecutive resistance of the substrate spreading and contacts resistance. With an increase of the frequency the specific negative resistance of the active layer of the IMPATT diode falls, and the frequency, on which the resistance of spreading becomes equal to the negative resistance, becomes limiting for the given diode.

In the development of semi-conductor sources in the short-wave sector of the microwave range, special attention should be given to the thermal operating modes of the active element, because overheating of the  $p-n$  junction does not allow us to receive the necessary value of the current density for the given range. Therefore, under certain conditions, a deep cooling of the GIMPATT diode can change the parameters of the active elements radically.

At low temperatures one of the basic restrictions, connected with the admissible power of scattering on the  $p-n$  junction, becomes less important, because the scattering power, which is taken away from the  $p-n$  junction, increases at the reduction of case temperature in accordance with the following simple formula:

$$P_{\text{scattering}} = \frac{T_{pn} - T_c}{R_T},$$

where  $T_{pn}$  — temperature of the  $p-n$  junction at the working current;  $T_c$  — temperature of the case of the diode during cooling;  $R_T$  — thermal resistance between the  $p-n$  junction and a heat sink.

The power of the generators on the IMPATT diodes created in the range of frequencies of 160...170 GHz, during cooling down to the temperature of 700 K increases approximately 5 times in comparison with the value of power at the room temperature, and equals to 40...50 mW.

Research shows, that for a cooled generator an increment of the output power at an increase of the supply current is higher, than that of the working one at room temperature. The output power on the second harmonic ( $f_0 = 312$  GHz) of the generator during cooling also increases approximately 4—5 times and equals to 1.2...2 mW. This quality in combination with the temperature stability of the GIMPATT diodes at low temperatures expands the limits of application of the semi-conductor generators in the terahertz range [21].

An important factor limiting the output power of the GIMPATT diode on high frequencies is the problem of coordination of a very small impedance of the diode with the impedance of the external electrodynamic design. Maintenance of high coefficients of the transformation of the diode impedance during its inclusion in the microwave circuit is the basic feature for creation of high-frequency generator-converting and amplifying devices on the IMPATT diodes with the minimal power losses.

Application of the mode of the external synchronization of the semi-conductor generators solves the problem of construction of the output cascades of a transmitter with high amplification coefficient, low level of the frequency noise and the level of the output power corresponding to the maximal power mode. The level of the frequency noise and stability of the frequency of the output signal are determined by the parameters of the synchronizing signal. This circumstance allows us to create highly stable sources with the minimal phase noises in the short-wave sector of the millimeter range, where construction of high-Q resonators is rather complicated. In many cases, the synchronization mode is more preferable than the mode of passive amplification.

An important advantage of the synchronized amplifiers on the IMPATT diodes is a possibility of a fuller use of the energy potential of the active element in the self-oscillatory mode and a number of other advantages, such as a weak dependence of the power of the output signal on the level of the input one, simplicity of the circuit and design owing to absence of the necessity to ensure stability to self-excitation, and smaller sensitivity to the temperature variations. The synchronized amplifiers on the IMPATT diodes have big output powers [17, 20, 22, 23].

The success in the technology of the heterobarrier structures, and also development of the wide-band-gap semiconductors can already in the near future introduce essential changes in the distribution of the scopes of applications between various types of the devices. However, the use of the two-electrode devices, such as the impact avalanche transit-time diode and the resonance-tunnel diode (RTD), apparently, will be justified also in future. This is explained by a sharp reduction of the output power of the transistor amplifiers and generators on frequencies over 100 GHz. Besides, the diode structures are better combined with the waveguiding ducts.

A small level of power can be compensated for by the addition of powers from several sources in the quasi-optical



electrodynamic designs. Due to similar reasons, of practical interest are also the frequency multipliers on the diodes with Schottky barrier operating both in the varistor and varactor modes, and also the highly effective frequency multipliers on the diodes with volume negative conductivity.

Throughout the recent decades' improvements in the functional complexity and speed of the systems were reached due to higher density of placement and reduction of the sizes of the elements, principle of operation of which did not depend on their scale. During transition to the sizes of the elements of tens or units of nanometers, a qualitatively new situation appears, when the quantum effects (tunneling, dimensional quantization, interference of the electronic waves) have a decisive impact on the physical processes in the nanostructures and functioning of the electronic devices on their basis [24–30].

We believe that the further development of the solid-state instruments and devices of the terahertz electronics is inevitably connected with development of the nanotechnologies. Their application already now allows us to improve essentially the characteristics of the traditional microwave transistors and create in future new devices based on the quantum effects [28–33].

### Signal detectors and receivers

Traditionally, for reception and detection of signals in the terahertz range, the bolometers, diodes with Schottky barrier and no-barrier Mott diodes [34–39] are broadly used. A wide range of the waveguide detectors on Schottky diodes with a zero displacement is produced by Virginia Diodes Inc., USA [6].

The work [34] presents  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ -bolometer based on the effect of warming up of the electronic gas, which can be used for detection of the terahertz and millimeter radiation. By the value of NEP the estimated equivalent noise power of the detector is comparable with the other known uncooled terahertz receivers, and at the room temperature and zero displacement it equals to  $5 \cdot 10^{-9} \text{ W/Hz}^{1/2}$ , while at  $T = 770 \text{ K}$  it equals to  $8 \cdot 10^{-16} \text{ W/Hz}^{1/2}$ . A calculation was done of the distribution of the field induced by the planar aerial in the aerial–detecting element system. It was demonstrated, that a planar butterfly-shaped aerial can amplify the intensity of the field in the sensitive element by 5 orders in comparison with the field of the supply wave.

Superconductor Nanotechnologies Co. (Russia) developed receivers (bolometers) in the range of 0.3...70.0 THz on the basis of the superconducting nanostructures, working on the electronic warming up effect [35]. The typical noise equivalent power (NEP)  $\approx 10^{-14} \text{ W/Hz}^{1/2}$  is achieved by cooling of the receiver down to 0.25...0.3 K.

For a long time, the Institute of Physics of Microstructures of RAS (Russia) has been studying characteristics of the low-barrier structures of the metal-insulator-metal type (MIM) and metal-semiconductor-metal type (MSM), and also opportunities of their application for detection of the terahertz radiation and radio-wave imaging [36–38]. It demonstrated, that at room temperature on such types of structures we can receive values of NEP less than  $10^{-12} \text{ W/Hz}^{1/2}$  or corresponding to them values of the equivalent to the noise difference of temperatures up to  $0.03 \text{ K/Hz}^{1/2}$ .

Now, various bolometers of the terahertz range are available in the foreign markets [39]. The superconducting tunnel junctions of SIS type can convert the submillimeter photons directly into the electric current, at that, their output efficiency approaches to the limit of one electron per one photon. This effect is widely applied in amalgamators, heterodynes, but can also be used and for direct detection.

Also of interest is the application of the pyroelectric receivers for detection of radiation in the terahertz range [40]. Such receivers are nonselective in the frequency range and have a threshold sensitivity of  $10^{-8} - 10^{-9} \text{ W/Hz}^{-1/2}$ . The pyroelectric effect has many applications in development of the receivers of the thermal radiation and for the recording of small and average temperature variations.

As the sensitive elements, the linear pyroelectrics are used, which have an irreversible polarization, and the ferroelectrics, characterized by a reverse spontaneous polarization. The ferroelectrics are more widespread because of the greater values of the pyroelectric coefficient. The sensitivity of the broadband thermal indicators (detectors) of the electromagnetic radiation using the pyroelectric effect is the same as that one of the best samples of the bolometers working at room temperature, and optical-acoustic receivers, but the latter have a considerably smaller constant of time.

The pyroelectric indicators can be used for measurement of the absolute values of the levels of the electromagnetic radiation flows [41, 42]. The work [41] describes one of the versions of the measuring instruments for power of the terahertz range. The sensitive elements of the pyroelectric indicators of the microwave power are made in the form of plane-parallel plates, on the sides of which metal contacts with the set resistance are deposited. One of the sides of the pyroelectric element is the receiver of radiation of the optical range, and another one is the microwave radiation receiver, which allows us to ensure a possibility of the absolute measurements of the microwave power in a wide dynamic range with high sensitivity and small lag effect of the device.

Fig. 2 presents one of the possible designs of a measuring instrument.

A sensitive pyroelectric element 1 is located in the waveguide 2. The top contact of the sensitive element 1 is connected to the amplifier 5. The signal is recorded by the indicator 6, the second outlet is earthed. The optical radiation from the source 4 falls on the internal part of the pyroelectric wedge or cone 1, the generator 7 and the synchronizer 8 ensure the modes of a pulse operation of the microwave modulators and the optical radiation.

The measuring instrument of the microwave power works on comparison of the signals of two powers. The measured microwave power and the power of radiation of the optical range are practically completely absorbed by the opposite surfaces of the pyroelectric receiver. The flows from the two sources generate the pyroelectric currents proportional to their powers phase-shifted by  $180^\circ$ . The resulting signal is equal to zero in case of equality of the investigated flow and the comparison flow, at that, the measuring circuit plays the role of the balance indicator, — the sensitivity of the measuring instrument depends on its sensitivity. The accuracy of measurement is defined by the coefficient of absorption of the microwave power and the radiation power of the optical

range, which are close to a unit, and also by the accuracy of calibration of the source of comparison, which is done by the standard black body.

Now, we witness the development of the receiving radio-vision systems. At the heart of this direction is the idea of construction and use of the so-called matrix receivers: linear or square lattices made of separate receiving modules and containing information concerning the form of the source of radiation on the common output. In general, the process of receiving of information can be considered as a process of measurement of the levels of radiation of this source, coming from different directions, with a subsequent synthesis of the resulting picture. At that, two versions of realization of such a process are possible.

In the first version, one receiver is used, which consistently provides information concerning the level of the radiation received as a result of swinging within a certain angle of all the aerial together with the receiver or as a result of the movement of the receiver in the focal plane of the motionless aerial.

The second version employs a linear matrix or a square lattice made of several separate receiving modules. Each of the modules supplies information about the level of radiation, received by it from its direction, to the common output.

The main advantage of the second version is higher speed and longer time of the signal accumulation, which allows us to raise essentially the sensitivity of the receiving system. The high speed allows us to use such matrix systems of the radio-vision for observation of the sources of radiation with the rapidly changing outlines. The high sensitivity allows us to use these systems in radio astronomy for observation of very remote space sources of radiation.

The idea itself of the transformation of the radio relief in the visible image is not new, however, the terahertz range appeared very promising for its realization. On the one hand, the means of modern radio engineering ensure high sensitivity for receiving of the electromagnetic signals, and on the other hand, with a reduction of the wavelength it is possible to realize matrix receiving designs in very compact forms with preservation of a rather high angular resolution [3].

The active radio-vision systems employing illumination can be applied both for the creation of an image and for terahertz spectroscopy. On frequencies over 500 GHz, the penetrating power of the radiation decreases, and combination of the radio-vision with spectroscopy becomes more complicated. The basic problem hindering the development of the radio-vision systems in a short-wave section of the electromagnetic spectrum of the terahertz range is accessibility of the sources and detectors. In the range below 200 GHz, the sources of radiation and high-quality detectors allow us to create systems, which can compete with the x-ray systems of backward scattering as far as the image quality and the costs are concerned. Higher frequency sources and receivers of radiation, which allow us to carry out electroscopy of the materials, are still too expensive. A number of European companies, and also IFM RAS (Russia) (see works [38, 43]) develop matrixes for the detectors of the terahertz range, similar to the thermal-vision uncooled matrixes. The appearance of such matrixes, undoubtedly, will make the terahertz radio-vision systems more available for application.

In future, the nanotechnologies can play an important role in the detection and generation of the terahertz radiation. From the calculations presented in [28, 29] and the results of measurements [44] it follows that the specific power of the junction between the nanowire from indium antimonide formed in the matrix of anode aluminum oxide and the gold contact equals to units of nF/cm<sup>2</sup>. Simple estimations show that at such a capacity the gold contact with the area of about 100 μm<sup>2</sup>, under which there is a "wisp" containing several tens of thousands of nanowires, will be an antenna of the terahertz range.

Fig. 3 presents a calculated dependence on the frequency of the power received by a matrix of four such round antenna elements with the diameter of 40 μm, the centers of which are placed in the tops of a square with a side of 100 μm. The calculated radiation efficiency of such an antenna appears over 90 %.

## References

1. **Fifth International Symposium on Space Terahertz Technology**, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*. 1995. Vol. 43, Issue 4. pp. 921–994. DOI: 10.1109/22.375254
2. **Mayaskaya V.** Osvoenie teragercovoj shcheli. Poluprovodnikovye pribory vtorgayutsya v submillimetrovyj diapason, *Ehlektronika: NTB*, 2011, no. 8, pp. 74–87 (in Russian).
3. **Eru I. I.** Teragercovaya tekhnika i tekhnologiya sovremennoe sostoyanie tendencii razvitiya I perspektivy prakticheskogo primeneniya, *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, 1997, no. 3, pp. 51–79 (in Russian).
4. **Isaev V. M., Kabanov I. N., Komarov V. V., Meshchanov V. M.** Sovremennye radioehlektronnye sistemy teragercovogo diapazona, *Doklady TUSUTA*, 2014, no. 4 (34), pp. 5–21 (in Russian).
5. **Karushkin N. F.** Vozmozhnosti primeneniya teragercovogo diapazona radiovoln, *Materialy 5-j mezhdunarodnoj konferencii I 3-ey mezhdunarodnoj studencheskoj konferencii problemy telekommunikacii NTUU-KPI 2011*, pp. 23–27 (in Russian).
6. **Alaverdyan S. A., Bokov S. I., Bulgakov V. O., Zajcev N. A.** et al. Teragercovyj diapazon chastot ehlektronnaya komponentnaya baza voprosy metrologicheskogo obespecheniya, *Obzory po ehlektronnoj tekhnike. Ser. 1. Ehlektronika SVCH*. Moskva, CNII ehlektronika, 2012, 74 p. (in Russian).
7. **Pozhidaev V. N.** Vozmozhnosti primeneniya teragercovogo diapazona radiovoln, *Radiotekhnika*, 2008, no. 5, pp. 5–8 (in Russian).
8. **Goutam Chattopadhyay.** Technology, Capability and Performance of Low Power Terahertz Sources, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, vol. 1, issue 1, pp. 33–53. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159561
9. **Schlecht E., Maiwald F., Chattopadhyay G., Martin S., Mehdi I.** Design considerations for heavily — doped cryogenic Schottky diode varactor multipliers, *Proceedings of the 12th International Symposium on Space Terahertz Technology. San Diego, USA*, 2001, pp. 485–494.
10. **Gershenzon E. M., Golant M. B., Negirev A. A., Savelev V. S.** Lamy obratnoj volny millimetrovogo i submillimetrovogo diapazonov voln, Moscow, Radio I svyaz, 1985, 135 p. (in Russian).
11. <http://www.istokmw.ru/vakuumnie-generatori-maloy-moshnosti> (in Russian).
12. **Tager A. S.** Lavino proletoyj diod i ego primenenie v tekhnike SVCH, *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1966, vol. 90, no. 4, pp. 631–666 (in Russian).

13. **Tager A. S., Vald-Perlov V. M.** Lavinno-proletnye diody i ih primenenie v tekhnike SVCH. *Moscow, Sovetskoe radio*, 1968. 480 p. (in Russian).
14. **Lyubchenko V. E.** Fundamentalnye ogranicheniya I perspektivy primeneniya poluprovodnikovyyh priborov v radiosistemah millimetrovogo diapazona voln, *Radiotekhnika*, 2002, no. 2, pp. 16–27 (in Russian).
15. **Dvornichenko V. P., Karushkin N. F., Malcev S. B., Chajka V. E.** Rabota LPD v rezhime radioimpulsnogo umnozheniya chastoty, *Ehlektronnaya tekhnika. Ser 1. Ehlektronika SVCH*, 1985, no. 4 (386), pp. 40–41 (in Russian).
16. **Karushkin N. F., Obuhov I. A., Balabanov V. M., Smirnova E. A.** Tverdotelnye moduli dlya generacii SVCH izlucheniya v diapazone chastot do 200 GGc, *Materialy 26-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii SVCH-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii "KryMiKo-2016"*, pp. 289–295 (in Russian).
17. **Karushkin N. F.** Fazovaya sinhronizaciya v moshchnyh impulsnyh priborah SVCH, *Materialy 26-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii SVCH-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii, "KryMiKo-2016"*, 2016, pp. 1712–1715 (in Russian).
18. [www.orion.org.ua](http://www.orion.org.ua).
19. **Karushkin N. F., Malcev S. B., Hitrovskij V. A.** Tverdotelnye SVCH moduli dlya radiotekhnicheskoy apparatury i sistem millimetrovogo diapazona dlin voln, *Tekhnologiya i konstruirovaniye v ehlektronnay apparature*, 2016, no. 1, pp. 3–7 (in Russian).
20. **Kasatkin L. V., Chajka V. E.** Poluprovodnikovye ustrojstva diapazona millimetrovyyh voln, *Sevastopol. "Veber"*. 2006. 319 p. (in Russian).
21. **Balabanov V. M., Karushkin N. F., Obuhov I. A., Smirnova E. A.** Istochniki SVCH moshchnosti na lavinno-proletnyh diodah v korotkovolnoy chasti millimetrovogo diapazona, *Materialy 27-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii "SVCH-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii" (KryMiKo-2017)*, 2017 (in Russian).
22. **Dvornichenko V. P., Karushkin N. F., Malyshko V. V., Orekhovskij V. A.** Poluprovodnikovyy generator impulsnogo dejstviya s ehlektronnym pereklyucheniem chastoty Ka-diapazona, *Tekhnologiya i konstruirovaniye v ehlektronnay apparatur*, 2015, no. 4, pp. 3–7 (in Russian).
23. **Karushkin N. F.** Ispolzovanie kolcevyyh struktur LPD dlya uvelicheniya srednej impulsnoj moshchnosti generatorov millimetrovogo diapazona, *Ehlektronnaya tekhnika. Ser 1. Ehlektronika SVCH*, 2010, no. 4 (507), p. 46–54 (in Russian).
24. **Aseev A. L.** Nanotekhnologii v poluprovodnikovoy ehlektronike, *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*, 2006, vol. 76, no. 7, pp. 603–611 (in Russian).
25. **Obuhov I. A.** Nekotorye problemy sovremennoj nanoehlektroniki, *Materialy 15-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii "SVCH-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii"*, 2005, pp. 5–7 (in Russian).
26. **Goncharuk N. M., Karushkin N. F.** Nitrid-gallievyy rezonansno tunnelnyj diod, *Trudy 19-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii "SVCH-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii"*, pp. 671–674 (in Russian).
27. **Goncharuk N. M., Karushkin N. F.** Rezonansno-ehmissionnyj diod na nitrid-gallievom katode s odnoslojnym katodnym pokrytiem, *Materialy 24-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii "SVCH-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii" (KryMiKo-2014)*. 2014, pp. 817–818 (in Russian).
28. **Obuhov I. A., Smirnova E. A.** Nanoprovod kak aktivnyj ehlement generatora SVCH-izlucheniya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 8, pp. 509–517 (in Russian).
29. **Obuhov I. A., Goroh G. G., Lozovenko A. A., Smirnova E. A.** Matricy nanoprovodov iz antimonida indiya i ih primeneniya dlya generacii SVCH izlucheniya, *Nanoindustriya*, 2017, no. 7 (77), pp. 96–108 (in Russian).
30. **Goncharuk N. M., Karushkin N. F.** Nitrid-gallievyy diod Ganna millimetrovogo diapazona, *Materialy 22-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii "SVCH-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii" (KryMiKo-2012)*, 2012, pp. 161–162 (in Russian).
31. **Goncharuk N. M., Karushkin N. F., Malyshko V. V., Orehovskiy V. A.** Terahertz Diode on Gallium Nitride Microcathode, *The Eighth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'13) and Workshop on Terahertz Technology (Teratech'13)*. Kharkov, Ukraine. June 23–28, 2013, pp. 85–87.
32. **Goncharuk N. M., Karushkin N. F., Malyshko V. V., Orehovskiy V. A.** Submillimeter diode on gallium arsenide nanostructure, *The Eighth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'13) and Workshop on Terahertz Technology (Teratech'13)*, Kharkov, Ukraine, June 23–28, 2013, pp. 121–123.
33. **Goncharuk N. M., Karushkin N. F., Malyshko V. V., Orehovskiy V. A.** Gallium nitride diode with tunnel injection, *Journal of Radio physics and Electronics*, 2013, vol. 4 (18), no. 3, pp. 69–78.
34. **Sizov F. F., Apanskaya M. V., Gumenyuk-Sychevskaya Zh. V.** et al. Mnogoehlementnye priemniki teragercovogo diapazona na CdHgTe, *Prikladnaya fizika*, 2011, no. 2, pp. 61–66 (in Russian).
35. **Smirnov K. V., Vahtomin Yu. B.** et al. Priemniki infrakrasnogo i teragercovogo izlucheniya na osnove sverhprovodnikovyyh nanostruktur, *Materialy 20-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii "SVCH-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii" (KryMiKo-2010)* (in Russian).
36. **Shashkin V. I., Vaks V. L., Danilcev V. M.** et al. Mikrovolnovye detektory na osnove nizkobarennyh planarnyyh diodov Shottki i ih harakteristiki, *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 2005, vol. 48, no. 6, pp. 544–551 (in Russian).
37. **Shashkin V. I., Murel A. V.** Diagnostika mikrovolnovyyh nizkobarennyh detektornyh diodov, *Materialy 17-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii "SVCH-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii" (KryMiKo-2007)*, 2007, pp. 587–588 (in Russian).
38. **Vostokov N. V., Korolev S. A., Shashkin V. I.** Primenenie nizkobarennyh struktur metall poluprovodnik metall dlya detektirovaniya mikrovolnovyyh signalov, *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2014, vol. 84, no. 7, pp. 91–95 (in Russian).
39. **Terahertz Hot** Electron Bolometer Detectors from 0.3 to 70 THz, *Insight Product Co.*, 2011. URL: <http://www.insight-product.com/detect3.htm>
40. **Dooley D.** Sensitivity of broadband pyroelectric terahertz detectors continues to improve, *Laser Focus World*, 2010, vol. 46, pp. 42–56.
41. **A. s. 263697** SSSR MPK G01r 21/04. Izmeritel moshchnosti SVCH / L. G. Gasanov, N. F. Karushkin, L. S. Kremenchugskij, P. I. Yashchishin. № 1250575/26-9; 25.06.68; published 10.11.70. № 8 (in Russian).
42. **Svich V. A., Dyubko S. F., Kuznichev V. M., Valitov R. A.** Piroehlektricheskij indikator submillimetrovogo diapazona, *Ehlektronnaya tekhnika. Ser 11. Kontrolno-izmeritelnaya apparatura*, 1968, no. 1, pp. 67–75 (in Russian).
43. **Shashkin V. I., Dryagin Yu. A., Zakamov V. R., Krivov S. V.** et al. Planarnye detektory dlya mnogoehlementnyh sistem radiovideniya millimetrovogo diapazona dlin voln, *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. 2007, vol. 51, no. 12, pp. 1077–1087 (in Russian).
44. **Bozhev I. V., Goroh G. G., Karushkin N. F., Lozovenko A. A.** et al. Elektricheskie harakteristiki nanoprovodov antimonida indiya v poristyyh matricah anodnogo oksida alyuminiy, *Materialy 28-oy Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii "SVCH-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii" (KryMiKo-2018)*, 2018, pp. 1041–1046 (in Russian).

Камалджит Сингх, e-mail: kamaljs@isac.gov.in, А. В. Нирмал,  
Спутниковый центр U R РАО, Бангалор, Индия

## КОРПУСИРОВАНИЕ МЭМС-СТРУКТУР ДЛЯ РАБОТЫ В ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Поступила в редакцию 19.07.2018

*В последнее время МЭМС разрабатывали по множеству направлений, с применением различных материалов и с упором, главным образом, на обеспечение экономически эффективных решений. Корпусирование МЭМС-структур сильно зависит от самих сенсоров, так как каждый из них работает в своей среде и имеет уникальные рабочие характеристики. Функциональное назначение МЭМС-структур имеет решающее значение при разработке их общего дизайна с учетом практического применения, так как МЭМС находятся в контакте с окружающей средой. Основным ограничением корпусирования является контакт датчиков с окружающей средой, что приводит к проблемам при работе с ними, сложностям при защите, залипаниям и нагрузкам. Выбор корпуса для МЭМС осуществляется с учетом материала и механических характеристик, температурного коэффициента расширения, температурной устойчивости, герметичности, модульности, химической стойкости, возможности интеграции и тестирования. В высокочастотной (ВЧ) области для МЭМС важными аспектами при корпусировании являются деградация вследствие таких явлений как полостной резонанс, заземление, неправильный (неполный) контакт, паразитные связи, приводящие к изменению производительности. В дальнейшем с увеличением диапазона частот эти последствия приобретают все более выраженный характер. Эта статья описывает проблемы, связанные с корпусированием ВЧ МЭМС, различные критерии, учитываемые при корпусировании МЭМС-структур в высокочастотной области, и предпочтительные решения для сведения к минимуму радиочастотных потерь.*

**Ключевые слова:** микроэлектромеханические системы (МЭМС), корпусирование на уровне пластины (WLP), материалы, высокие частоты, высокочастотные микроэлектромеханические системы (ВЧ МЭМС)

### Введение

Корпусирование является важным фактором при производстве интегральных схем (ИС) и МЭМС, так как на него приходится 70...80 % всей стоимости. Основное внимание при корпусировании уделяется электрической защите чипа (электростатическое экранирование), защите от коррозии подложки, влагостойкости и минимизации напряжений на границе раздела, в то время как для механической защиты устройство должно быть жестким и устойчивым и к тому же удобным в обращении [1]. Не так давно МЭМС перешли из области механики в многопрофильную область и чистый кремний сейчас заменяют на множество материалов, выбор которых проводится на основе электрических, тепловых и механических свойств. Выбор материала играет важную роль в защите, и в настоящее время в МЭМС используют такие материалы, как кремний, вольфрам, титан, стекло, керамика, углерод, полиимид и др. [2]. Защита устройства от воздействий окружающей среды требует, чтобы устройства были электрически и механически изолированы, с оптической и тепловой защитой, химически изолированы и пассивированы, чтобы свести к минимуму воздействие влаги. Большую часть материалов, используемых для корпусирования, выбирают исходя из значений коэффициента теплового расширения. Обычно МЭМС-структуры не являются плоскими, имеют движущиеся части, чувствительны к окружающей среде и склонны к

поверхностным эффектам. МЭМС-структуры изготавливают с использованием методов микрообработки (объемная/поверхностная), микролитографии и гальваники (LIGA) или лазерной микрообработки.

МЭМС-датчики используют в различных областях — автомобильной, аэрокосмической, промышленном производстве, медицине, биоинжиниринге, потребительских товарах и т. д., что требует, соответственно, различных типов и методов корпусирования. Для МЭМС-датчиков и актюаторов требуется управляющая электроника, которая должна быть интегрирована с основным устройством и помещена в единый корпус для защиты. Управляющая электроника, такая как ASIC (application-specific integrated circuit) — "интегральная схема специального назначения", работает в области смешанных сигналов и имеет дело с аналоговым сигналом на входе и цифровым сигналом на выходе. При разработке этой электроники необходимо учитывать ее специфические особенности, связанные с МЭМС-устройствами, такие как считывание сигналов слабого уровня, низкотемпературный дрейф, вызванные смещением (сдвигом) уровня и чувствительностью.

Различные типы корпусов используют для корпусирования кристаллов интегральных схем (ИС) и их стали применять для МЭМС-устройств. Корпуса бывают либо пластиковыми, либо керамическими, например DIP (два в линию), CERDIP (керамические двойной линии), SOJ (в корпусе ти-

па SO с J-выводами по двум сторонам корпуса), SSOP (пленочный малогабаритный корпус), CLCC (керамический кристаллоноситель без выводов), CQFJ (керамический плоский четырехъядерный с J-выводами), TQFP (тонкий четырехъядерный плоский), BGA (массив шариковых выводов), BCC (кристаллоноситель со столбиковыми выводами), PLCC (пластиковый кристаллодержатель с выводами), металлическая емкость, кристаллоноситель, массивы контактов и т. д. Стандартная техника корпусирования сталкивается с рядом проблем в области МЭМС, начиная от резки, обработки (разделения и комплектации), генерации остаточных механических напряжений, дегазации, что играет важную роль при изготовлении датчика, так как даже взятие заготовки вакуумным захватом может повредить поверхностные элементы МЭМС-устройства. Защита хрупких МЭМС-устройств также должна осуществляться во время сборочных и упаковочных процессов, таких как нарезка и очистка. [3]. Основными функциями корпусирования являются: обеспечение функционирования микромеханики; защита от воздействия окружающей среды и создание соединений с другими компонентами системы. ИС являются планарными структурами, а МЭМС — объемными (трехмерными). Основные особенности, связанные с корпусированием ИС и МЭМС, приведены в табл. 1.

Наличие готовых МЭМС-сборок требует рассмотрения нескольких связанных эффектов, касающихся движущихся частей. Сложность МЭМС-сборок связана с необходимостью наличия контролируемой герметичности в целях защиты от внешней среды и обеспечения электрической и химической устойчивости. Герметизация чипов является сложной задачей и может осуществляться различными методами, такими как сварка, термокомпрессионное соединение, пайка стеклокристаллическим

припоем и анодное сращивание, тогда как эпоксидный компаунд используется для негерметичного соединения.

Корпусирование МЭМС для высокочастотного применения отличается от стандартного ввиду работы с высокой частотой, которая приводит к появлению нежелательных эффектов на линиях передачи сигнала или к появлению нежелательного паразитного излучения. В этом случае сборка высокочастотных МЭМС может осуществляться с использованием стандартных ИС-корпусов с большими изменениями, или можно применять корпусирование на уровне подложки, что является даже более предпочтительным ввиду уменьшения паразитных эффектов. Стандартное корпусирование требует дополнительного анализа с использованием метода конечных элементов, с тем чтобы определить различные потери и паразитные сигналы, связанные с методологией сборки, а в случае корпусирования на уровне подложки, внедрение и интеграция имеют решающее значение [3]. Основные элементы дизайна сборки для высокочастотного применения:

- электромагнитное моделирование;
- механический анализ (сборка и корпусирование);
- тепловой анализ;
- анализ материалов и аспектов надежности.

В этой работе подробно описаны различные типы и методы корпусирования, их выбор и роль для высокочастотного применения, критические аспекты и изготовление МЭМС с помощью стандартных операций сборки.

### Тип сборки

Корпусирование на уровне подложки и упаковка в масштабе кристалла являются основными технологиями корпусирования. Главными преимуществами, связанными с корпусированием на уровне подложки, являются низкая стоимость, минимизация паразитных сигналов, герметичность и компактный размер. Также можно использовать стандартные методы и оборудование для сборки с дополнительными преимуществами в виде возможности повторного использования, пайки с помощью линии поверхностного монтажа и простоты сборки. Дальнейшие сложности, связанные с резкой, обработкой и сборкой, можно смягчить с помощью этой методики [4]. Корпусирование на уровне подложки делится на две категории: 0-уровень сборки и 1-уровень сборки.

0-уровень сборки обеспечивает защитный интерфейс для устройств, имеющих герметичные полости. Он обеспечивает стабильную и контролируемую среду, не вызывая термомеханических напряжений. 1-уровень сборки состоит из стандартных

Таблица 1  
Table 1

Сравнение корпусирования ИС и МЭМС  
Package comparison

МЭМС <i>MEMS Packaging</i>	ИС <i>IC Packaging</i>
Жесткая подложка <i>Rigid substrate</i>	Может быть гибким <i>Can be flexible</i>
Чувствительны к окружающей среде <i>Sensitive to environment</i>	Нечувствительна к окружающей среде <i>Insensitive to environment</i>
Большой размер контактных площадок <i>Large pad size</i>	Малый размер контактных площадок <i>Small pad size</i>
Влияние остаточных напряжений <i>Effect of residual stress</i>	Минимальное влияние остаточных напряжений <i>Minimal effect of residual stress</i>

корпусов для размещения корпусов 0-уровня. 0-уровень сборки — это защитный слой вокруг устройства, который выступает в качестве защитного интерфейса. К нему предъявляются следующие технические требования:

- минимальные тепловые напряжения, связанные с несоответствием коэффициента термического расширения;
- простота интеграции с процессами МЭМС;
- лучшее рассеивание теплоты;
- экранирование от электрических, магнитных и электромагнитных полей;
- контролируемые объемные пространства — герметичные полости;
- высокая прочность.

Этот подход для защиты МЭМС можно разделить на два метода: тонкие пленки и крышка для корпуса. Тонкопленочное покрытие главным образом используется в поверхностной микрообработке, где травящий раствор поступает через канал, который потом запечатывается с помощью конформного покрытия или CVD-нитрида. Основные проблемы, связанные с этой техникой, — воздействие высокой температуры за счет использования слоев алюминия или золота [5].

Крышка для корпуса снимает указанные выше ограничения благодаря устойчивости к температу-

ре и контролю за окружающей средой. Крышка с углублением присоединяется к МЭМС-устройству на уплотнительное кольцо. Соединение может осуществляться с помощью эпоксидных уплотнителей, полимеров, припоев, термокомпрессионным соединением "золото-золото". Присоединение заготовок с помощью полимерных клеев, таких как эпоксидные смолы, может привести внутрь корпуса влагу и органические пары, которые могут воздействовать на некоторые части сборки и привести к коррозии и залипанию. Стабильное давление внутри полости требует низких показателей утечки, которые можно получить размещением внутри газопоглощающих материалов для того, чтобы поглощать влагу и газы. Стандартные методики сборок в области высокочастотного применения, принятые Gridhar и др. [6], не являются универсальными и помимо проблем при обращении с устройствами имеют ограничения при высокочастотном использовании. Выбор базового материала в таких сборках является важным моментом, так как рассеивание теплоты играет важную роль для надежности сборки. Поэтому алмазная основа является предпочтительной по сравнению с керамической, но другие параметры также должны быть заранее подобраны в соответствии с табл. 2.

Таблица 2  
Table 2

Свойства материалов дляборок МЭМС  
Packaging Material Properties

Материал <i>Material</i>	Механические свойства <i>Mechanical Properties</i>	Электрические свойства <i>Electrical properties</i>	Химические свойства <i>Chemical properties</i>	Другие свойства <i>Other</i>
Металл <i>Metal</i>	Хорошие <i>Good</i>	Проводник	Различная коррозионная стойкость <i>Corrosion resistance</i>	—
Эпоксидная смола <i>Epoxy</i>	Хорошие <i>Good</i>	Хороший изолятор	Плохая влагостойкость <i>Poor moisture barrier</i>	Усадка при термообработке <i>Shrinkage while curing</i>
Флуорокарбон <i>Flurocarbon</i>	—	Средние <i>Desirable</i>	—	Плохая адгезия <i>Poor adhesion</i>
Акрил <i>Acrylic</i>	—	Хороший диэлектрик <i>Good</i>	Низкая стойкость к растворителям <i>Poor solvent resistance</i>	Жесткий, прочный, упругий <i>Hard, rigid, tough</i>
Парилен <i>Parylene</i>	—	Хороший диэлектрик <i>Good</i>	Проницаемость к влаге и газам <i>Poor moisture and gases permeability</i>	Плохая адгезия <i>Poor adhesion</i>
Полиамидные <i>Polyimide</i>	Хорошие <i>Good</i>	Хороший диэлектрик <i>Good</i>	—	Стабильные в широком диапазоне температур <i>Stable at wider temperature</i>
Стекло <i>Glass</i>	—	Отличный диэлектрик <i>Good</i>	—	Выбрано согласно коэффициенту теплового расширения <i>Chosen according to TCE value</i>
Керамика <i>Ceramic</i>	—	Отличный диэлектрик <i>Good</i>	Отличная влагостойкость и химическая инертность <i>Excellent moisture barrier &amp; chemically inert</i>	Хрупкая, неупругая <i>Brittle, low fracture toughness</i>

Другие материалы, такие как силикон, подвержены возникновению воздушных пузырей, а полиуретан нестойк к растворителям.

### Важнейшие аспекты корпусирования ВЧ МЭМС

Корпусирование играет важную роль при изготовлении МЭМС для высокочастотной области, так как оно обеспечивает физическую защиту, а также защиту от загрязнений (влажность, частицы и реактивные элементы) для обеспечения стабильности в ВЧ МЭМС [7]. Критериями для методов корпусирования, используемых для ВЧ МЭМС, являются:

- минимальное влияние в высокочастотной области;
- отсутствие паразитных излучений;
- исключение заливаний;
- защита устройства от внутреннего и внешнего загрязнений (герметичность, газопоглощение и т. д.);
- защита устройства от воздействия внутренней и внешней теплоты за счет управления энергией, оптимального температурного цикла, техники сборки;
- высокая изоляция и низкие перекрестные помехи.

Основные элементы ВЧ МЭМС — выключатели, перестраиваемые фильтры, массивы, фазосдвигающие устройства, FBAR-устройства, плоские антенны [8, 9] и т. д. Пассивные цепи, такие как микроантенные структуры, требуют открытой среды для обеспечения излучения, в то время как фильтры и линии передачи должны быть защищены от нежелательного излучения [10]. Такие структуры требуют дополнительных операций при сборке, а также простых методов соединения, так как отсутствует необходимость в обеспечении работы движущихся частей. Сборку ВЧ МЭМС можно разделить на две части: обычная сборка и сборка на уровне пластины. Обычная сборка включает в себя стандартный корпус с передающими линиями и шиной питания. Стандартное присоединение подложки вместе с проволочными связями осуществляется согласно рис. 1 (см. третью сторону обложки). При этом при моделировании необходимо учитывать влияние паразитных эффектов, вызванных термокомпрессионными соединениями проволочных выводов и разъемов [7]. В дальнейшем эффекты полостей необходимо моделировать, чтобы избежать нежелательного резонанса. Критерием выбора конкретной сборки является прозрачность в нужном ВЧ диапазоне вкупе с минимальными принесенными потерями и отсутствием других сигналов, защита от усталостных напряжений, ударов и вибрации.

Корпусирование на уровне пластины является наиболее подходящим подходом ввиду ликвидации проволочных соединений в ВЧ тракте. Технологии коммутирования (простое коммутационное покрытие или покрытие через переходные отверстия) можно успешно применять, однако покрытие через переходные отверстия является более интенсивным процессом и требует дополнительных операций [11].

Также для ВЧ МЭМС размер сборки должен быть небольшим, недорогим и сборка должна осуществляться с высокой производительностью. Это требование может быть удовлетворено корпусированием на уровне пластины для упаковки МЭМС-устройств в чистой среде, но проблема заключается в необходимости одновременной сборки вместе ВЧ компонентами без ущерба для производительности [12]. Эпоксидные смолы, бензоциклобутен и стеклокерамический припой являются уплотнительными материалами для подложек. Табл. 3 показывает типичные методы герметизации и связанные с этим среды.

Корпусирование на уровне пластины является наиболее подходящим для ВЧ устройств и возможными методами коммутации и их реализации для ВЧ МЭМС являются:

- плоскостная горизонтальная коммутация;
- заглубленная коммутация;
- коммутация через высокочастотную подложку;
- коммутация через крышку.

Методика коммутации "через подложку" играет важную роль для снижения последовательной индуктивности в цепи сигнала, как показано на рис. 2

Таблица 3  
Table 3

#### Методы герметизации Sealing methods

Метод герметизации <i>Sealing method</i>	Среда герметизации <i>Sealing environment</i>
Шовная сварка <i>Seam weld</i>	Инертный газ <i>Inert gas</i>
Лазерная сварка <i>Laser weld</i>	Инертный газ <i>Inert gas</i>
Au-Sn пайка <i>Au-Sn</i>	Инертный газ <i>Inert gas</i>
Пайка низкотемпературным стеклом <i>Low temp glass</i>	Супер сухой воздух <i>Super dry air</i>
Пайка припойными материалами <i>Solder</i>	Супер сухой воздух <i>Super dry air</i>
Использование эпоксидных смол <i>Epoch</i>	Воздух <i>Air</i>
Уплотнение пучками электронов <i>Electron beam seal</i>	Вакуум после сухого воздуха <i>Vacuum followed by dry air</i>

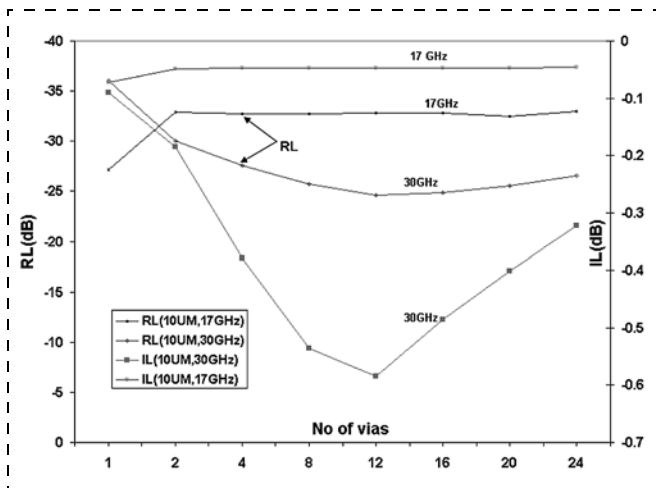


Рис. 2. Анализ свойств в частотном диапазоне Ku- и Ka [11]  
Fig. 2. Via analysis at Ku- and Ka-band [11]

[11]. Анализ показывает, что оптимальное число отверстий равно 3, при этом влияние вариаций параметров является незначительным.

Анализ методом конечных элементов проводится для определения тепловых напряжений и анализа механической стабильности функционирования МЭМС-устройства и определения срока его работоспособности. Входные данные, необходимые для конечно-элементного анализа: геометрия, материал, загрузка условий и надежности модели. Модели используют коэффициенты теплового расширения, модуль Юнга, пределы давления/напряжения/деформации, текучесть, пластичность, температурную зависимость. Условия нагрузки выделяются в профиль температуры, механические соединения и внешние силы, тогда как модели надежности являются связью между напряженно-деформированным состоянием и прочностными свойствами материала.

Устройство упаковывается (рис. 3, см. третью сторону обложки) в обычные коммерчески доступные корпуса [13], монтируется на алюминиевую пластину с использованием проводящих связующих материалов, таких как эпоксидная смола с добавлением металла. Для некоторых применений требуется токонепроводящая среда, например, изоляционный полиимид и эпоксидные смолы для соединения, которые могут выдержать постоянное ускорение согласно стандарта MIL. Перед монтажом устанавливается передающая линия, характеризующаяся потерями в Ka-диапазоне. МЭМС-подложки устанавливаются в корпус, в котором уже сформированы соединения для ввода и вывода. Моделирование и последующий анализ показали, что три параллельных проволочных вывода (1 мил толщиной и длиной 1 мм) для соединения с корпусом являются оптимальными для соединения и снижения потерь передачи и минимизации взаим-

ной индуктивности [13]. Мостовые конструкции для соединений, применяющихся в РЧ-МЭМС, также показывают повышение производительности при работе в радиочастотном диапазоне при использовании трех мостовых соединений. По сравнению с проволочным соединением ленточное соединение имеет 1,25 dB/мм дополнительных потерь на частотах S-диапазона. Вышеуказанная методология будет работать только в диапазоне частот S-диапазона, а на более высоких частотах необходимо применять корпусирование на уровне пластины.

## Заключение

В данной работе представлены основные методики сборки, главным образом связанные с радиочастотными компонентами в области МЭМС. Основная задача при корпусировании МЭМС — сохранить преимущества миниатюризации без привнесения термоэлектрического напряжения. Так как МЭМС больше ориентированы на использование в конечной продукции и зависят от области применения, то роль корпусирования исключительно важна для защиты от возможных загрязнений. Усовершенствование методов корпусирования идет в направлении MCM, flip-chip, лабораторийна-чипе, но привнесенные при этом дополнительные паразитные сигналы в радиочастотных устройствах требуют проведения моделирования перед реализацией на практике.

Корпусирование РЧ МЭМС обеспечивает физическую защиту и защиту от загрязнения, влажности, частиц или реактивных элементов. Для такой защиты необходимы миниатюрные герметичные корпуса с низкими потерями, не создающие помех для работы в РЧ диапазоне. В настоящее время акцент делается на системах, требующих совмещения МЭМС и высокоскоростных ИС в одном корпусе в целях сохранения целостности сигнала, что ставит дополнительные задачи ввиду сложности процесса. Корпусирование радиочастотных МЭМС — дело будущего и использование методов корпусирования на уровне пластины 0-уровня является предпочтительным для обеспечения надежности и экономически эффективных решений. Стадии процесса изготовления необходимо подстраивать перед началом серийного выпуска на заводе, чтобы соответствовать желаемым частотам.

*Авторы благодарят заместителя директора и директора центра за их поддержку.*

## Список литературы

1. Ananthuresh G. K., Vinoys K. J., Gopalakrishnan S., Bhat K. N., Aatre V. K. Micro and Smart Systems, John Wiley & Sons, India, 2012. 498 p.



2. **Камадж Сингх.** Выбор материала подложки в технологиях производства. МЭМС для СВЧ приложений // Нано- и микросистемная техника. 2017. Vol. 19, N. 7. P. 422—431.

3. **Golio M.** (Eds.). RF and Microwave semiconductor device. CRC press, 2003. 333 p.

4. **Schropter G., Lorenz G., Yano K., Mackoba H.** et al. Development and Verification of standard packaging library for Advanced MEMS design // EPMC 2005, June 12—15, Belgium.

5. **Kamaljeet Singh.** Principle of RF & its applications in RF-MEMS Switches, Prabhat Prakshan, 2018.

6. **Gridhar M. S. Ashwini J., Jiju J.** et al Design, fabrication, testing and packaging of a silicon micromachined RF microelectromechanical series RF-MEMS switch // Sadhana. 2013, Vol 38. Issue 2. P. 297—316.

7. **Karmakar A., Singh K.** Full-wave Analysis and Characterization of RF Package for MEMS Applications // Microwave Review. 2016. August. P. 17—21.

8. **Kamaljeet Singh, Pal S.** RF-MEMS: getting ready for prime time // High frequency electronics. August 2008. P. 18—23.

9. **Pillans B., Rebeiz G., Leem J.-B.** Advances in RF-MEMS // 2003 IEEE, GaAs Digest, P. 17—20.

10. **Drayton R. F., Herderson R. M., Katehi L. P. B.** Advanced monolithic packaging concepts for high performance circuits and antennas // 1996 IEEE-MTT-S Digest. P. 1615—1618.

11. **Kamaljeet Singh, Nirmal A. V.** Bond wire and its characterization at RF frequencies // High frequency electronics. 2017. N. 2. P. 30.

12. **Malshe A., O'Neal C., Singh S. B., Brown W. D., Eaton W. P., Miller W. M.** Challenges in the packaging of MEMS // International Journal of Microcircuits and electronics packaging. 1999. Vol. 22, N. 3. P. 233—241.

13. **Kyocera.** URL: <http://www.kyocera.com>

14. **Kamaljeet Singh, Nagachenchaiah K.** Simple Modelling Approach for Via-Hole Characterization on Silicon Substrate at Ka-Band // Microwave Review. 2011. Vol. 17, N. 1. P. 20—23.

---

**Kamaljeet Singh**, e-mail: [kamaljs@isac.gov.in](mailto:kamaljs@isac.gov.in)

**A. V. Nirmal**, ISRO Satellite Centre, Bangalore,

*Corresponding author:*

**Kamaljeet Singh**, ISRO Satellite Centre, Bangalore, e-mail: [kamaljs@isac.gov.in](mailto:kamaljs@isac.gov.in)

## Packaging Solutions for MEMS Structures in Radio Frequency Domain

*Received on July 19, 2018*

*Accepted on August 24, 2018*

*Recently MEMS has evolved as multi-domain structures using variety of materials and mainly concentrated on providing cost effective solutions. MEMS packaging is sensor specific as each sensor works in different environment and having unique operational specifications. The functional specification of MEMS chip is critical to the overall design of the packages keeping into consideration of practical application as mostly MEMS is in contact with the environment. The major limitations in MEMS packaging is the contact of miniaturized sensors with the environment resulting in major issues such as handling, protection, stiction and stress. The package selection for MEMS is based on material and mechanical characteristics, temperature coefficient of expansion (TCE) match, temperature durability, hermetic sealing, modularity, chemical durability, integration viability and testing aspects. In RF domain packaging aspects are critical as degradation of performances due to varied phenomena associated with the package such as cavity resonances, grounding, improper contact, parasitic leads to performance variations. Further these effects are more pronounced with the increase the frequency range. This article details the challenges associated with MEMS packaging, various criteria considered in RF packaging and preferable packaging techniques to minimize the RF losses.*

**Keywords:** *Micro-electro mechanical systems (MEMS), Wafer level packaging (WLP), materials, radio frequency*

*For citation:*

**Kamaljeet Singh, Nirmal A. V.** Packaging Solutions for MEMS Structures in Radio Frequency Domain, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 178—186.

DOI: 10.17587/nmst.21.178-186

### Introduction

Packaging is an important consideration in integrated circuits (IC) and MEMS as 70—80 % of cost is accounted for packaging. The main consideration in packaging is the electrical protection of the chip such as electrostatic shielding, substrate corrosion, moisture resistance, minimization of interface stresses whereas mechanical protection demands device to be rigid and stable beside convenient in handling [1]. Recently MEMS domain changed from mechanical to multi-domain where pure silicon is replaced with multitude of materials and ITS selection is according to electrical, thermal and mechanical properties. Material selection in packages

plays an important role in protection and materials such as silicon, tungsten, titanium, glass, ceramics, carbon, polyimides etc are being presently used in MEMS [2]. The environment protection needs device to be electrically and mechanically isolated, optical and thermal protected, chemical isolated and passivated to minimize moisture effect. Most of the material employed for packaging is chosen to have similarity of temperature coefficient of expansion (TCE). Conventionally MEMS structures are not flat, having moving parts, sensitive to environment and prone to surface effects. MEMS structures are fabricated using micromachining (bulk/surface), micro-molding (LIGA) or laser micromachining techniques. Further MEMS sensors cater for various applications such as

automotive, aerospace, industry, medical, bio-engineering, consumer etc and needs varied packaging methodologies. MEMS sensors and actuators need processing electronics which is to be packaged in integrated way so as to protect the circuitry. The processing electronics such as ASIC is primarily in mixed signal domain consisting of analog in the front end and digital in the back end. The main considerations of developing such electronics is due to specific features associated with MEMS devices such as picking up of low signal levels, low temperature drifts associated with offset and sensitivity.

Various types of packages are being employed in IC domain and same has been extended for MEMS devices also. The packages are either plastic or ceramic types namely DIP (dual-in-line), CERDIP (ceramic dual in line), SOJ (small outline J-bend), SSOP (shrink small outline), CLCC (ceramic leadless chip carrier), CQFJ (ceramic quad flat J-type), TQFP (thin quad flat package), BGA (ball grid array), BCC (bump chip carrier), PLCC (plastic leadless chip carrier), metal can, chip carrier, pin array etc. Standard packaging techniques poses lot of issues in MEMS domain ranging from dicing, die handling (separation and picking), stress generation, outgassing which plays an important role in sensor performance such as picking the die from vacuum pick-up can damage the surface features of MEMS devices. The protection of fragile MEMS devices is also to be taken care during various assembly and packaging processes such as dicing and cleaning [3]. The main functions of packages are: providing mechanical support, protection from surrounding environment and building electrical interconnection to other system components. As ICs are flat and MEMS are non-flat devices so main aspects related with packaging of IC and MEMS are shown in table. 1.

The off the shelf availability of MEMS packages needs consideration related with multiple effects associated with the moving parts. The complexity of MEMS packaging is associated with the need of controlled hermetic sealed environment so as to protect from environmental factors and further to provide electrical and chemical robustness. Hermetic sealing of chip is challenging and can be carried out by various techniques such as welding, thermo-compression bonding, glass frit bonding and anodic bonding whereas epoxy is used for non-hermetic sealing.

The packaging of RF is different than the standard packages due to high frequency operation which introduced undesirable effect of transmission lines or act as a radiating element. RF packaging for MEMS can be carried out using standard IC packages with major modifications or can employ wafer level packaging where latter is more preferable due to reduced parasitic. Standard packaging techniques at RF necessitates finite element analysis so as to characterize various losses and parasitic associated with the packaging methodology whereas in case of wafer level packaging (WLP), the implementation and integration is critical [3]. Main elements of a RF package design are:

- Electromagnetic simulation,
- Mechanical analysis (assembly and package),
- Thermal analysis,
- Materials and reliability aspects.

In this article detailing of various packages and techniques, choice and role of package selection for RF, its critical aspects and assembly of MEMS die using standard package is presented.

## Packaging Type

Wafer level packaging (WLP) and chip scale packaging (CSP) are the main packaging techniques. The main advantages associated with the wafer level packaging are the low cost, less parasitic, hermeticity and compact size. Also standard techniques and equipment can be employed for the packaging with the added advantages such as re-workability, soldering using SMT line and ease of assembly. Further the challenges associated with the dicing, handling and encapsulation can be mitigated using this technique [4]. WLP packaging is divided into two categories: (a) 0-level package (b) 1-level package.

0-level packaging provides the protective interface having hermetically sealed cavity. It provides stable and controlled ambient without inducing thermo-mechanical stress. 1-level package consists of standard packages for accommodating 0-level packages. Wafer level packaging (0-level) package scale a protective layer around the device which acts as a protective interface. Technical requirements associated with these packages are:

- Minimal thermal stresses due to CTE mismatch,
- Ease of integration with MEMS processes,
- Better heat dissipation,
- Shielding against electrical, magnetic and electro-magnetic fields,
- Controlled cavity ambient,
- High strength.

This approach can be further divided into thin film and chip-capping. Thin film capping is primarily employed in surface micromachining where etchant enters through the channel which is afterwards sealed employing conformal coating or CVD nitride. The major challenges associated with this technique are exposure to high-temperature process due to usage of aluminium or gold layers [5].

Chip capping alleviates the above limitations due to flexibility of temperatures and control of the environment. Recessed capping chip is bonded to the MEMS device on to the sealing ring. The bonding can be carried out using the epoxy seals, polymers adhesives, solder bonding, gold-gold thermo-compression bonding. Die attachment using polymer such as epoxies generate water and organic vapour during curing which can re-deposit on the small features resulting in corrosion and stiction. Stable pressure inside the cavity requires low leak rates which can be overcome by inclusion of getter materials so as to absorb moisture and other gases. Standard RF packaging concept as adopted by Gridhar et al [6] is not generic and poses sever limitations to RF performance apart from handling issues. The base material selection in such packages are important parameter as heat dissipation plays an important role for the package reliability due to which diamond base is preferred compared to ceramic but other parameters are also to be considered before implementation as shown in table 2.

Other materials such as silicone are prone to air bubble entrapment and polyurethane is attacked with the solvents.

## Critical Aspects in RF packaging

Packaging plays a major role in RF MEMS performance as package provides physical protection as well as protection from contaminants such as moisture, particles or reactive elements besides providing stable RF performance [7]. The cri-

teria for the package techniques employed for the RF-MEMS devices are:

- Minimal effect on the RF performance,
- No added parasitic,
- Avoidance of proximity coupling,
- Protecting the device from internal and external contamination (hermeticity, gettering etc.),
- Protecting the device from internal and external heat due to power handling, temperature cycling, assembly technique,
- Higher isolation and low cross talk.

Main RF-MEMS devices are switches, tunable filters, arrays, phase shifter, FBAR devices, planar antennas [8–9] etc. Passive circuits such as micro-machined antenna structure needs open environment for radiation whereas filters and transmission lines to be protected from undesirable radiation effects [10]. Such structures need extra processing steps along with simple bonding techniques as no mechanical movement are involved. The packaging of RF devices can be categorized into two parts (a) conventional packaging (b) WLP. Conventional packaging consists of standard packages having RF transitions along with DC feed-through. Standard die attachment along with wire bonds are employed as shown in Fig. 1 (see the 3-rd side of cover). The characterization of the same needs incorporation of the parasitic effects in simulation which are due to wire bonds and transitions [7]. Further cavity effects need to be modelled so as to avoid undesired resonance. The criteria of choosing particular package demands to remain invisible to RF in the desired signal path related with low insertion loss and opaque for other signals besides protecting from fatigue, shock and vibration.

WLP is the most suitable approach due to elimination of bond-wires in RF path. Either of the technique such as plain capping or via capping can be implemented where via capping is a process intensive and needs extra processing steps [11].

Also for RF MEMS, package must be small, inexpensive and high-performance. This requirement can be satisfied by the wafer-level packaging (WLP) technique to package MEMS devices in the clean room environment but the challenge lies packaging along with RF interconnects without sacrificing the performance [12]. Epoxy, benzocyclobutene (BCB), and glass frit are reported for wafer bonding sealing materials. Table 3 shows the typical sealing method and associated environment.

WLP approach is the most suitable for RF devices and the possible implementation methodology in RF-MEMS devices for the same are:

- Planar feed-through (horizontal),
- Buried RF feed-through,
- Substrate RF via,
- Via through cap.

Via in the substrate plays an important role as extra inductance and corresponding analysis [11] is shown in Fig 2 (see the 3-rd side of cover). It also shows that optimum number of vias are 3 beyond which performance variation is minimal.

Finite element analysis to be carried out for finding out package induced thermal stresses and mechanical behaviour such as mechanical stability for the functioning of MEMS devices and calculating the lifetime of the packages. The inputs required for FEM are: geometry, material, loading conditions and reliability models. Material models consist of CTE, Young modulus, stress/strain/deformation limits, creep, plasticity,

temperature dependency. Loading conditions are segregated into temperature profile, mechanical attachment, and external forces whereas reliability models are linkage between stress/strain and material strength.

The device packaged in commercial available RF packages [13] and mounted on alumina board for package characterization using conductive die attach material is employed such as metal filled epoxy. Certain application requires non conductive media such as insulating polyimide and epoxies for attachment which can withstand constant acceleration as per MIL standard. Before mounting the DUT, a straight CPW transmission line is attached and characterized for the losses up to Ka band. MEMS die is mounted on the connectorized package having input and output connectors. The modelling and subsequent analysis revealed that 3 parallel wire bonds (1 mil thick with 1mm length) for package connections are optimum in lowering the transmission losses as mutual inductance effects are minimized [13]. The bridge structures for connections employed in RF-MEMS also show enhancement in RF performance by employing three air-bridges. Compared with wire bond, hanging ribbon bonding introduces 1.25 dB/mm extra losses at C-band frequencies. The above methodology will work only upto S-band and at higher frequencies WLP techniques to be implemented.

## Conclusion

This article present the basic of packaging methodologies mainly associated with the RF circuits in MEMS domain. The main aspects in MEMS packaging is to keep intact miniaturization without introduction of thermo electrical stress. As MEMS is more product driven and application specific so the role of packaging is paramount for MEMS devices to protect from the contamination. The advanced packaging techniques are moving towards MCM, flip-chip, lab-on-chip but introduction of extra parasitic in RF devices are associated with them which necessitates modelling before implementing the same in actual conditions.

Packaging in RF-MEMS also provides physical protection as well as contamination protection such as moisture, particles or reactive elements. Miniaturized low-loss hermetic package without affecting the RF performances are the prerequisite for the package. The present focus is on the system requiring MEMS and high frequency IC to be packaged in a single entity so as to keep signal integrity intact which put extra challenges due to processing complexity. RF MEMS packaging is further challenging and usage of WLP techniques at 0-level is preferred for providing robust and cost effective solutions. The processing steps needs to be modified accordingly before starting the batch run in the foundry and to be characterized at the desired frequencies.

***Acknowledgement:** Authors gratefully acknowledge Deputy Director and Director for their support and encouragement.*

## References

1. **Ananthuresh G. K., Vinoys K. J., Gopalakrishnan S., Bhat K. N., Aatre V. K.** *Micro and Smart Systems*, John Wiley & Sons, India, 2012. 498 p.
2. **Kamaljeet Singh.** Substrate Material Considerations in MEMS Processes for RF Applications, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 7, pp. 422–431 (in Russian).

3. **Golio M.** (Eds). *RF and Microwave semiconductor device*, CRC press, 2003. 333 p.
4. **Schropter G., Lorenz G., Yano K., Mackoba H.** et al. Development and Verification of standard packaging library for Advanced MEMS design, *EPMC* 2005, June 12–15, Belgium.
5. **Kamaljeet Singh.** *Principle of RF & its applications in RF-MEMS Switches*, Prabhat Prakshan, 2018.
6. **Gridhar M. S., Ashwini J., Jiju J.** et al. Design, fabrication, testing and packaging of a silicon micromachined RF microelectromechanical series RF-MEMS switch, *Sadhana*, 2013, vol. 38, issue 2, pp. 297–316.
7. **Karmakar A., Singh K.** Full-wave Analysis and Characterization of RF Package for MEMS Applications, *Microwave Review*, August 2016, pp. 17–21.
8. **Kamaljeet Singh, Pal S.** RF-MEMS: getting ready for prime time, *High frequency electronics*, August 2008, pp. 18–23.
9. **Pillans B., Rebeiz G., Leem J.-B.** Advances in RF-MEMS, *2003 IEEE GaAs Digest*, pp. 17–20.
10. **Drayton R. F., Herderson R. M., Katehi L. P. B.** Advanced monolithic packaging concepts for high performance circuits and antennas, *1996 IEEE-MTT-S Digest*, pp. 1615–1618.
11. **Kamaljeet Singh, Nirmal A. V.** Bond wire and its characterization at RF frequency, *High frequency electronics*, 2017, no. 2, pp. 30.
12. **Malshe A., O'Neal C., Singh S. B., Brown W. D., Eaton W. P., Miller W. M.** Challenges in the packaging of MEMS, *International Journal of Microcircuits and electronics packaging*, 1999, vol. 22, no. 3, pp. 233–241.
13. **Kyocera**, available at: <http://www.kyocera.com>
14. **Kamaljeet Singh, Nagachenchaiah K.** Simple Modelling Approach for Via-Hole Characterization on Silicon Substrate at Ka-Band, *Microwave Review*, 2011, vol. 17, no. 1, pp. 20–23.

УДК 531.7:661.68

DOI:10.17587/nmst.21.186-192

**С. И. Торгашин**, канд. техн. наук, временный генеральный директор,  
**В. Е. Пауткин**, канд. техн. наук, главный специалист,  
 АО "НИИФИ", г. Пенза, e-mail: [inercial@niifi.ru](mailto:inercial@niifi.ru)

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СХЕМ КОМПЕНСАЦИИ УГЛОВОГО РАСТРАВЛИВАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МЭМС-СТРУКТУР

Поступила в редакцию 02.11.2018

*Рассмотрены различные топологические варианты компенсирующих элементов внешних углов мезоструктур при анизотропном травлении кремния в растворе гидроксида калия. Проведены экспериментальные исследования различных топологических схем компенсации. Показано, что при травлении на различную глубину и при использовании различных схем компенсации на травленной поверхности кремния остаются следы компенсаторов разной величины. Полученные данные необходимо принимать во внимание при изготовлении МЭМС-устройств.*

**Ключевые слова:** объемная микрообработка кремния, микромеханические датчики, компенсация углового растравливания, компенсирующий элемент, МЭМС

### Введение

Чувствительные элементы микромеханических датчиков, таких как датчики давления, ускорения, угловой скорости, содержат кремниевый кристалл, выполненный размерной объемной микрообработкой кремния [1–3]. Технология изготовления кремниевых кристаллов таких датчиков также известна как технология микроэлектромеханических систем, или МЭМС-технология. Указанная технология базируется на таких видах объемной микрообработки исходных кремниевых пластин, как глубокое реактивно-ионное травление кремния, жидкостное анизотропное и изотропное травление кремния или их комбинации. Жидкостное анизотропное травление (чаще всего используемый травитель — это раствор гидроксида калия КОН) получило широкое распространение в МЭМС-технологии благодаря возможности формирования кремниевых структур со стенками, заранее опре-

деленными кристаллографическими плоскостями кремния. Чаще всего рабочей плоскостью является плоскость (100), позволяющая формировать структуры с вертикальными стенками [4–6]. Однако при этом остро встает вопрос сохранения внешних углов формируемых кремниевых мезоструктур, так как это напрямую влияет на метрологические характеристики изготавливаемых датчиков [7]. В связи с этим в технологии изготовления МЭМС актуальной задачей является компенсация углового растравливания формируемых структур.

### Общие сведения

Для микромеханических датчиков очень важно сохранить прямоугольную форму формируемых структур, например, таких как маятник или инерционная масса акселерометра, "жесткий центр" мембраны датчика давления. Это связано с недопустимостью потери физической массы кремния,

так как уменьшение инерционной массы приводит к отклонению диапазона измерений от расчетных значений, т. е. невоспроизводимости характеристик чувствительного элемента.

Из литературных источников известны топологические варианты компенсации углового травливания, представляющие собой добавление во внешние углы формируемых структур элементов (компенсаторов) в следующих видах: квадрата, центр которого совмещен с вершиной формируемой структуры [8]; прямоугольных полосок, стороны которых ориентированы вдоль кристаллографических направлений [110] [9] либо направлений [100] [10], а также компенсаторы треугольной [11] и других топологических форм [12]. Расположение элементов компенсации, а также их форма связаны с анизотропией травления кремния по различным кристаллографическим направлениям.

Топологическим вариантам компенсаторов присущи такие недостатки, как значительная площадь элемента компенсации (для компенсаторов квадратной формы), а также значительная длина компенсатора (в случае элемента в виде полосок или треугольной формы), что может ограничивать их применение при наличии в топологии близко расположенных соседних формируемых структур ввиду смыкания элементов при проведении процесса анизотропного травления.

Другой важной проблемой является наличие следов элементов компенсации после проведения процесса анизотропного травления. Следы могут быть видны в оптический микроскоп, их наличие связано с кристаллографическим строением кремния, а влияние на механические параметры получаемых структур требует дальнейшего изучения.

#### Исходные данные для проведения исследований

Для оценки размера следов компенсаторов после процесса травления разработаны топологические компенсирующие элементы в форме прямоугольных полосок и треугольной формы, как показано на рис. 1 (см. четвертую сторону обложки), как наиболее часто встречающиеся в литературных источниках [8–11, 13] типы компенсирующих элементов.

Тестовые структуры с топологией компенсирующих элементов сформированы на полированной кремниевой пластине КЭФ-4,5 с ориентацией рабочей плоскости (100) по слою термически выращенного слоя оксида кремния толщиной 0,55 мкм, служащего защитной маской при травлении. Глубина травления предполагалась равной не более 150 мкм, исходя из толщины полученного защитного слоя оксида кремния [9].

#### Расчет компенсаторов

*Компенсатор прямоугольной формы.* Длину полоскового компенсатора можно представить в следующем виде:

$$l = \frac{d \frac{V_{110}}{V_{100}} - \frac{1}{2} b \cos \alpha}{\sin \alpha}, \quad (1)$$

где  $d$  — глубина травления;  $V_{110}$ ,  $V_{100}$  — скорости травления в направлениях [110] и [100] соответственно;  $\alpha$  — угол между стороной компенсатора и направлением базового среза на пластине. Учитывая, что стороны компенсатора ориентированы вдоль направлений [110], а также скоростей травления кремния в указанных направлениях [8], формула (1) преобразуется к виду  $l = 2,5d$ .

При  $d$ , равной 150 мкм, длина компенсатора составит 375 мкм. Ширина компенсатора произвольная, в данной работе принята равной 30 мкм, исходя из возможностей фотолитографического оборудования и возможности визуального наблюдения за процессом травления.

*Диагональный компенсатор.* Стороны такого компенсатора ориентированы вдоль кристаллографических направлений [100]. С учетом анизотропии травления кремния ширина такого компенсатора будет  $b = 2d$  и составит 300 мкм. Длина компенсатора должна быть более  $2,5d$ , что также связано с анизотропией скоростей травления по различным кристаллографическим направлениям.

*Компенсатор треугольной формы.* Для расчета компенсатора треугольной формы можно воспользоваться методикой, изложенной в работе [11], которая основана на построении защитного компенсирующего элемента на предполагаемом незащищенном внешнем углу мезаструктуры. Для глубины травления, составляющей 150 мкм, рассчитаны следующие соотношения для компенсатора треугольной формы (рис. 1, в):  $a = 375$  мкм;  $b = 580$  мкм;  $c = 300$  мкм.

#### Проведение исследований

Травление структур осуществляли в водном растворе КОН концентрации 25 % при температуре 96...98 °С. Скорость травления кремния при таких условиях составляла 2,5...2,7 мкм/мин, глубину травления контролировали индикатором стрелочным 1 МИГ (ГОСТ-9696—82) с погрешностью измерений  $\pm 1,0$  мкм. Фотографии протравленных структур, полученные с помощью инспекционного микроскопа *Nicon Eclipse L200N*, представлены на рис. 2, 3 (см. четвертую сторону обложки).

На рис. 2 видны следы на травленной поверхности кремния, остающиеся от стравливаемых компенсаторов. Данные следы не исчезают до конца при травлении пластины кремния на заданную

глубину, приближаясь по длине к первоначальным размерам компенсаторов, как видно на рис. 3.

Для определения геометрических размеров следов компенсаторов проведена их оценка путем измерения профиля поверхности. На рис. 2 а, с, и 3, а, с показано направление измерения профиля. Для компенсатора диагональной формы, изображенного на рис. 2, b, измерения не проводили в силу того, что высота компенсатора увеличивается по мере увеличения глубины травления, в то время как его ширина постоянно уменьшается со скоростью  $2V_{100}$ .

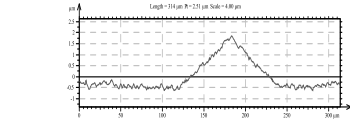
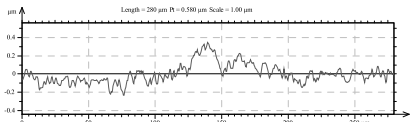
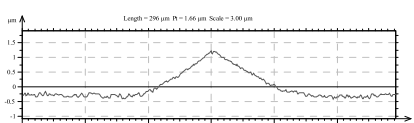
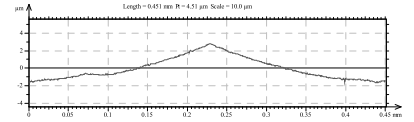
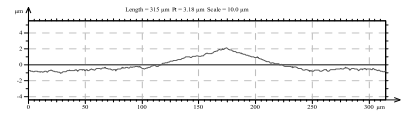
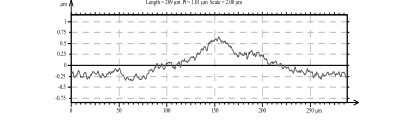
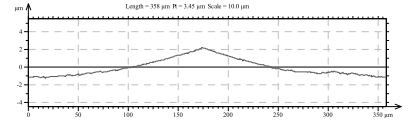
Измерения профиля следов компенсаторов проводили профилометром PF-60 (Mitaka Kohki Co., Ltd, Япония) с датчиком точной автофокусировки,

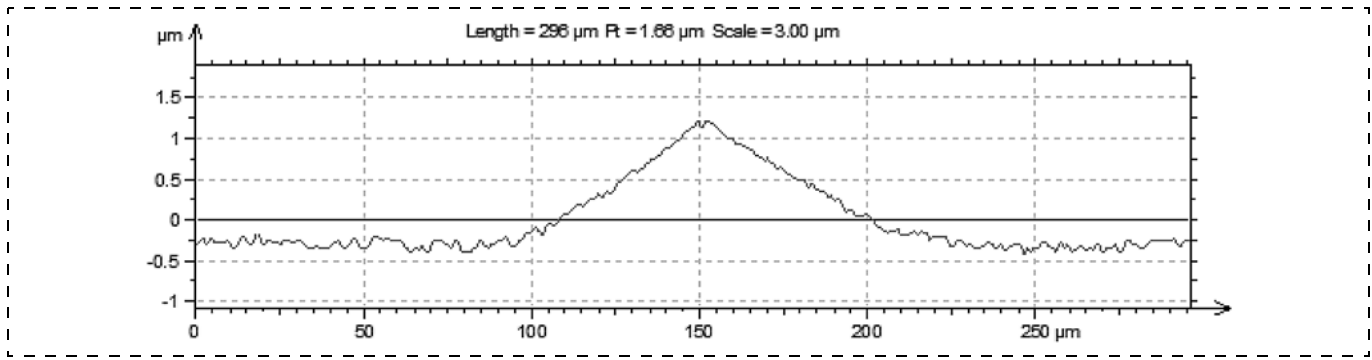
позволяющим формировать трехмерную топографию поверхности при температуре окружающей среды в диапазоне (21...24) °С и относительной влажности  $50 \pm 10 \%$ . Измеряемую поверхность предварительно обдували сжатым воздухом. Наличие виброгасящего стола профилометра позволяет отсекаать возможную вибрацию, способную повлиять на результаты измерений. В таблице и на рис. 4, 5 представлены результаты исследований следов компенсаторов.

### Результаты измерений следов компенсаторов

Из полученных данных (см. таблицу) следует, что на травленной поверхности кремния присутствуют следы компенсаторов, представляющие собой

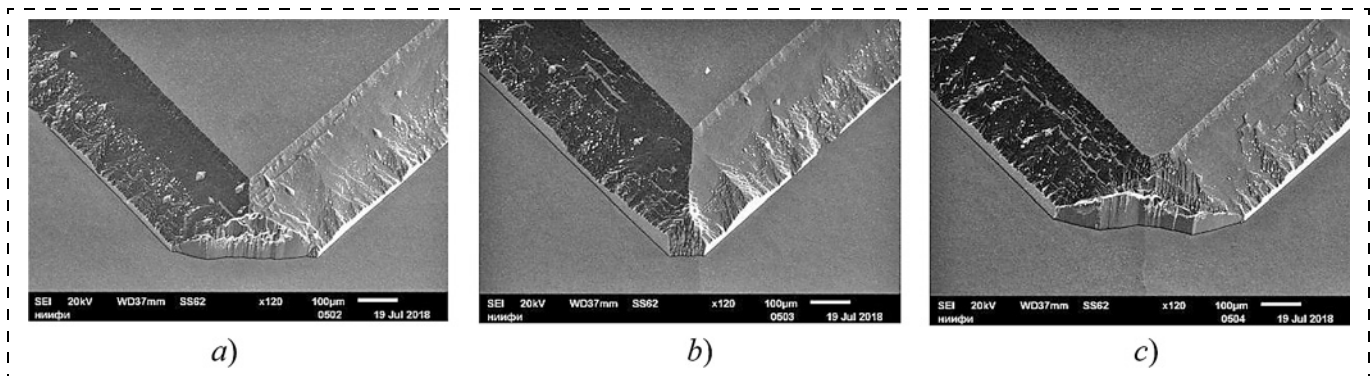
**Результаты измерений следов компенсаторов**  
Results of measurements of the compensators' traces

№	Вид компенсатора Kinds of compensators	Глубина травления, мкм Depth of etching, $\mu\text{m}$	Параметры компенсаторов Parameters of the compensators		
			Значение максимума следов профиля компенсаторов, мкм Values of the maximal traces of the compensators' profile, $\mu\text{m}$	Рисунок Fig.	Вид профиля следов компенсаторов Kinds of profiles of the compensators' traces
1	Компенсатор прямоугольной формы Rectangular form	75 ± 1,0	2,51	Рис. 2, а Fig. 2, а	
		150 ± 1,0	0,58	Рис. 3, а линия 1 Fig. 3, а line 1	
			1,66	Рис. 3, а линия 2 Fig. 3, а line 2	
2	Диагональный компенсатор Diagonal form	75 ± 1,0	—	—	—
		150 ± 1,0	4,51	Рис. 3, b Fig. 3, b	
3	Треугольный компенсатор Triangular form	75 ± 1,0	3,18	Рис. 2, с Fig. 2, с	
		150 ± 1,0	1,01	Рис. 3, с линия 1 Fig. 3, с line 1	
			3,45	Рис. 3, с линия 2 Fig. 3, с line 2	



**Рис. 4. Профиль следа протравленного компенсатора прямоугольной формы**

*Fig. 4. Profile of the trace of the etched compensator of a rectangular form*



**Рис. 5. Тестовые структуры, защищенные компенсаторами прямоугольной формы (а), диагональным компенсатором (b), компенсатором треугольной формы (с)**

*Fig. 5. Test structures protected by the compensators of the rectangular forms (a), a diagonal compensator (b), and a compensator of a triangular form (c)*

рельефы значением 0,58...3,45 мкм в зависимости от глубины травления и вида компенсирующего элемента (прямоугольной формы, диагональный компенсатор, треугольный компенсатор).

Так, высота следа увеличивается к вершине тестовой структуры для компенсаторов прямоугольной и треугольной форм, оставаясь постоянной для компенсатора диагональной формы. Наличие травленных следов можно связать с различием скоростей травления вглубь пластины и в направлениях, предпочтительных для растравливания каждой из компенсирующих фигур. Их присутствие, по-видимому, может приносить дополнительные механические напряжения в формируемые анизотропным травлением кремниевые микроstructures, поэтому следует добиваться получения максимально плоских травленных поверхностей в целях повышения качества микромеханических датчиков [14, 15].

### **Заключение**

Рассмотрены различные топологические варианты компенсирующих элементов внешних углов мезаструктур при анизотропном травлении в растворе гидроксида калия. К их числу относятся компенсаторы прямоугольной (в том числе диагональ-

ные) и треугольной формы. Экспериментально установлено, что травление данных компенсаторов приводит к появлению на травленной поверхности кремния следов компенсирующих элементов значением от 0,58 до 3,45 мкм в зависимости от глубины травления и топологического варианта компенсирующего элемента. Такой характер распределения следов приводит к необходимости выбора топологических вариантов размещения компенсирующих элементов при изготовлении кристаллов с учетом конструктивных особенностей микромеханических датчиков в целях получения максимально плоских травленных поверхностей.

### **Список литературы**

1. Козлов Д. В., Смирнов И. П., Жуков А. А., Болотник Н. Н. Микромеханические компоненты микроробототехнических устройств космического назначения // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 3. С. 173—177.
2. Гридчин В. А., Зиновьев В. Б., Чебанов М. А. Микропрофилирование и оптимизация характеристик кремниевых сенсоров давления // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 7. С. 432—439.
3. Веселов Д. С., Воронов Ю. А. Особенности применения жидкостного травления кремния в технологии изготовления МЭМС-структур // Датчики и системы. 2016. № 4. С. 26—28.

4. **Agarwal A., Samson S., Bhansali S.** Fabrication of vertical mirrors using plasma etch and KOH:IPA polishing // *J. Micromech. Microeng.* 17. 2007. P. 26–35. doi: 10.1088/0960-1317/17/1/004.

5. **Aydemir A., Terzioglu Y., Akin T.** A new design and a fabrication approach to realize high performance three axes capacitive MEMS accelerometer // *Sens. Actuators. A.* 2016. 244. P. 324–333.

6. **Babak Amir Parviz, Khali Najafi.** A geometric etch-stop technology for bulk micromachining // *J. Micromech. Microeng.* 2001. N 11. P. 277–282.

7. **Торгашин С. И., Пауткин В. Е., Крайнова К. Ю.** Конструктивно-технологические решения, определяющие геометрию формируемых микромеханических структур при анизотропном травлении кремния // *Приборы.* 2017. № 11 (209). С. 40–45.

8. **Готра З. Ю.** Технология микроэлектронных устройств: Справочник. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.

9. **Ушков А. В., Исакова Г. А., Рябов В. Т.** Разработка методики компенсации выпуклых углов при формировании мембраны чувствительного элемента давления с жестким центром в водном растворе КОН // *Нано- и микросистемная техника.* 2007. № 6. С. 55–58.

10. **Ionascu G., Bogatu L., Apostolescu T. C., Manea E., Cernica I., Morlova A.** Study of Compensation Structures for Silicon Micromachining // *1ST International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics, Mechanical Engineering and New High-Tech Products Development, MECANITECH'09.* P. 136–143.

11. **Prem Pal, Kazuo Sato.** A comprehensive review on convex and concave corners in silicon bulk micromachining based on anisotropic wet chemical etching // *Micro and Nano Systems Letters.* 2015. Vol. 3. N. 6. DOI: 10.1186/s40486-015-0012-4.

12. **Пауткин В. Е., Мишанин А. Е.** Способ защиты углов кремниевых микромеханических структур при анизотропном травлении / Патент РФ № 2667327, МПК H01L 21/308. Заявка № 2017129792 от 22.08.2017.; опубл. 18.09.2017, бюл. № 26.

13. **Ветрова Е. В., Смирнов И. П., Козлов Д. В., Запетляев В. М.** Особенности создания чувствительных элементов кремниевых и кварцевых маятниковых акселерометров // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы.* 2017. Т. 4. Вып. 2. С. 95–102.

14. **Соколов Л. В., Архипов С. В., Школьников В. М.** Исследование механизма глубинного анизотропного травления кремния при формировании объемных микромеханических структур в кремнии (100) // *Микроэлектроника.* 2003. Т. 32. № 3. С. 194–201.

15. **Мусалимов В. М., Ротц Ю. А., Астафьев С. А., Амвросьева А. В.** Расчет надежности упругих элементов микромеханических гироскопов. СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО, 2012. 127 с.

---

**S. I. Torgashin**, Ph. D., Temporary General Director, **V. E. Pautkin**, Ph. D. tech. Sc., Chief specialist, JSC "Scientific Research Institute of Physical Measurements", Penza, 440026, Russian Federation, e-mail: inercial@niifi.ru.

*Corresponding author:*

**Pautkin Valery E.**, Candidate of Technical Sciences, Chief specialist, Scientific Research Institute of Physical Measurements, Penza, 440026, Russian Federation, e-mail: PVE1976@yandex.ru.

## Specific Features of Application of the Compensation Versions for Angle Etching during Formation of MEMS

*Received on November 02, 2018*

*Accepted on December 03, 2018*

*The article presents various topological versions of the compensating elements of the external angles of the mesa structures for an anisotropic etching of silicon in a solution of potassium hydroxide, and experimental studies of various topological compensation versions. It shows that etching to different depths and use of different compensation versions leave traces of compensators of various sizes on the etched silicon surface. The obtained data should be taken into account in manufacture of MEMS devices.*

**Keywords:** volumetric micromachining of silicon, micromechanical sensors, compensation for angular etching, compensating element, MEMS

*For citation:*

**Torgashin S. I., Pautkin V. E.** Specific Features of Application of the Compensation Versions for Angle Etching during Formation of MEMS, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 186–192.

DOI: 10.17587/nmst.21.186-192

### Introduction

Sensitive elements of the micromechanical sensors, such as sensors of pressure, acceleration, and angular speed, contain a silicon crystal made by the technology of dimensional volume microprocessing of silicon [1–3]. The technology for manufacturing of the silicon crystals for such sensors is also known as the technology of microelectromechanical systems,

or MEMS technology. The specified technology is based on such kinds of volume microprocessing of the initial silicon plates, as deep reactive-ion etching of silicon, liquid anisotropic and isotropic etching of silicon or their combinations. The liquid anisotropic etching (the most frequently used etchant is a solution of potassium hydroxide, KOH) became widespread in MEMS technology due to a possibility of formation



of the silicon structures with the set in advance walls of the crystallographic planes of silicon. Most frequently a working plane is the plane (100), allowing us to form structures with vertical walls [4–6]. However, a sharp question arises of preservation of the external angles of the formed silicon mesa structures, as it directly influences the metrological characteristics of the produced sensors [7]. In this connection, a topical problem in MEMS manufacturing technologies is the task of compensation for the angular etching of the formed structures.

### General information

For the micromechanical sensors it is very important to preserve the rectangular form of the formed structures, for example, such as a pendulum or an inertial weight accelerometer, "the rigid centre" of the membrane of the pressure sensor. This is connected with inadmissibility of a loss of the physical weight of the silicon, because a reduction of the inertial weight leads to a deviation of the range of measurements from the calculated values, i.e. to a nonreproductivity of the characteristics of the sensitive element.

We know topological versions of compensation for the angular etching, which means addition to all the external angles of the formed structures of the elements (compensators) in the form of a square, the centre of which is combined with the top of the formed structure [8], rectangular strips, the sides of which are orientated along the crystallographic directions [110 9] or directions [100 10], and also compensators of the triangular [11] and other topological forms [12]. Location of the compensatory elements and their forms are connected with the anisotropy of etching of silicon along various crystallographic directions.

The topological variants of the compensators are characterized by such drawbacks as a considerable area of a compensating element (for the compensators of the square form), and also a considerable length of a compensator (in case of an element in the form of strips or a triangular form), which can limit their application in case of presence in topology of closely located neighboring formed structures in view of a linkup of the elements during carrying out of the process of anisotropic etching.

Another important problem is presence of traces of the compensating elements after carrying out of the process of anisotropic etching. The traces can be visible in an optical microscope, their presence is connected with the crystallographic silicon structure, while their influence on the mechanical parameters of the received structures requires further studying.

### Initial data for undertaking of the research

In order to evaluate the traces of the compensators after the etching process, the compensating topological elements were developed in the forms of rectangular strips or of triangular forms, shown in fig. 1 (see the 4-th side of cover), as the most widespread [8–11, 13] kinds of the compensating elements.

The test structures with the topology of the compensating elements were generated on KEF-4.5 polished silicon plate with orientation of the working plane (100) on the layer of a thermally grown layer of silicon oxide with thickness of 0.55  $\mu\text{m}$ , serving as a protective mask during etching. The expected depth of etching was equal to no more than 150  $\mu\text{m}$ , proceeding from the thickness of the received protective layer of the silicon oxide [9].

### Calculation of the compensators

*Compensator of a rectangular form.* The length of a strip compensator can be presented as the following:

$$l = \frac{d \frac{V_{110}}{V_{100}} - \frac{1}{2} b \cos \alpha}{\sin \alpha}, \quad (1)$$

where  $d$  — depth of etching;  $V_{110}$ ,  $V_{100}$  — speeds of etching in the directions of [110] and [100], accordingly;  $\alpha$  — angle between the side of the compensator and the direction of a base cut on a plate. Considering the fact, that the compensator sides are orientated along the directions of [110], and also the speeds of etching of silicon in the specified directions [8], the formula (1) will be transformed to the following form:  $l = 2.5d$ .

If  $d$  is equal to 150  $\mu\text{m}$ , the length of the compensator will be 375  $\mu\text{m}$ . The width of the compensator is arbitrary and in this work it is assumed as equal to 30  $\mu\text{m}$ , proceeding from the potential of the photolithographic equipment and opportunities for a visual observation of the etching process.

*Diagonal compensator.* The sides of such a compensator are orientated lengthways of the crystallographic directions [100]. Taking into account the anisotropy of silicon etching, the width of such a compensator will be  $b = 2d$  and equal to 300  $\mu\text{m}$ . The length of the compensator should be more than 2.5  $d$ , which is also connected with the anisotropy of the speeds of etching via various crystallographic directions.

*Compensator of a triangular form.* For calculation of the compensator of a triangular form it is possible to take advantage of the technique presented in the work [11] and which is based on construction of a protective compensating element on the expected unprotected external angle of the mesa structure. For the depth of etching equal to 150  $\mu\text{m}$ , the following correlations were calculated for a compensator of a triangular form (fig. 1,  $c$ , see the 4-th side of cover):  $a = 375 \mu\text{m}$ ;  $b = 580 \mu\text{m}$ ;  $c = 300 \mu\text{m}$ .

### Research work

Etching of the structures was done in KOH water solution of 25 % concentration at temperature of 96..98  $^{\circ}\text{C}$ . In such conditions the speed of etching of silicon was 2.5..2.7  $\mu\text{m}/\text{min}$ , the depth of etching was controlled by 1 MIG arrow indicator (GOST-9696—82) with inaccuracy of measurements of  $\pm 1.0 \mu\text{m}$ . The photos of the etched structures received by means of *Nicon Eclipse L200N* inspection microscope, are presented in fig. 2, 3 (see the 4-th side of cover).

Fig. 2 shows the traces on the etched silicon surface left by the etched compensators. The given traces do not disappear altogether during etching of a silicon plate at the set depth, approaching by their length to the initial sizes of the compensators, as is shown in fig. 3.

For determination of the geometrical sizes of the traces of the compensators, their evaluation was done by means of measuring of the surface profile. Fig. 2,  $a$ ,  $c$  and 3,  $a$ ,  $c$  show the direction of measurement of the surface profile. For a compensator of a diagonal form presented in fig. 2,  $b$ , measurements were not taken, because the height of the compensator increased in the process of growth of the depth of etching, while its width decreased constantly with the speed of  $2V_{100}$ .

Measurements of the profiles of the compensators' traces were made by PF-60 profilometer (Mitaka Kohki Co., Ltd, Japan) with a sensor of the precise autofocusing allowing us

to form a three-dimensional topography of the surface at an ambient temperature within the range of 21...24 °C and relative humidity of 50 ± 10 %. The measured surface was preliminarily fanned by compressed air. The available vibration-absorbing table of the profilometer allowed us to neutralize a possible vibration, which could influence the results of the research of the compensators' traces. The table below and fig. 4, 5 present the results of research of the compensators' traces.

From the obtained data (see the table) it follows that there are traces of the compensators on the etched surface, which have the forms of a relief with the values of 0.58...3.45 μm, depending on the depth of etching and kind of a compensating element (of a rectangular form, a diagonal compensator, or a triangular compensator).

Thus, the height of a trace increases closer to the top of the tested structure for the compensators of the rectangular and triangular forms, remaining constant for the compensators of the diagonal forms. Presence of the etched traces can be connected with different speeds of etching deep into the plates and in the directions preferable for etching of each of the compensating figures. Apparently, their presence can introduce additional mechanical stresses in the silicon microstructures formed by the anisotropic etching, therefore, it is necessary to achieve reception of maximally possible flat etched surfaces for improvement of the quality of the micro-mechanical sensors [14, 15].

## Conclusion

Various topological versions of the compensating elements of the external angles of the mesa structures were considered during an anisotropic etching in a solution of the potassium hydroxide. Among them were compensators of the rectangular (including diagonal) and triangular forms. It was experimentally established, that etching of the given compensators resulted in occurrence on the etched silicon surface of the traces of the compensating elements with the values from 0.58 up to 3.45 μm depending on the depth of etching and the topological version of the compensating element. Such a character of distribution of the traces leads to the necessity of selection of the topological versions of placing of the compensating elements during manufacturing of crystals with account of the design features of the micromechanical sensors for reception of the maximally possible flat etched surfaces.

## References

1. **Kozlov D. V., Smirnov I. P., Zhukov A. A., Bolotnik N. N.** Mikromekhanicheskiye komponenty mikrorobototekhnicheskikh ustroystv kosmicheskogo naznacheniya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 173—177 (in Russian).
2. **Gridchin V. A., Zinov'ev V. B., Chebanov M. A.** Mikroprofilirovaniye i optimizatsiya kharakteristik kremniyevykh sensorov davleniya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 7, pp. 432—439 (in Russian).

3. **Veselov D. S., Voronov Yu. A.** Osobennosti primeneniya zhidkostnogo travleniya kremniya v tekhnologii izgotovleniya MEMS-struktur, *Datchiki i sistemy*, 2016, no. 4, pp. 26—28 (in Russian).
4. **Agarwal A., Samson S., Bhansali S.** Fabrication of vertical mirrors using plasma etch and KOH:IPA polishing, *J. Micro-mech. Microeng.*, 2007, vol. 17, pp. 26—35, doi: 10.1088/0960-1317/17/1/004.
5. **Aydemir A., Terzioglu Y., Akin T.** A new design and a fabrication approach to realize high performance three axes capacitive MEMS accelerometer, *Sens. Actuators. A.*, 2016, is. 244, pp. 324—333.
6. **Babak Amir Parviz, Khali Najafi.** A geometric etch-stop technology for bulk micromachining, *J. Micromech. Microeng.*, 2001, no. 11, pp. 277—282.
7. **Torgashin S. I., Pautkin V. Ye., Kraynova K. Yu.** Konstruktivno-tekhnologicheskkiye resheniya, opredelyayushchiye geometriyu formiruyemykh mikromekhanicheskikh struktur pri anizotropnom travlenii kremniya, *Pribery*, 2017, no. 11 (209), pp. 40—45 (in Russian).
8. **Gotra Z. Yu.** Tekhnologiya mikroelektronnykh ustroystv: Spravochnik. Moscow, Radio i svyaz', 1991. 528 p. (in Russian).
9. **Ushkov A. V., Isakova G. A., Ryabov V. T.** Razrabotka metodiki kompensatsii vypuklykh uglov pri formirovaniy membrany chuvstvitel'nogo elementa davleniya s zhestkim tsentrom v vodnom rastvore KON, Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, 2007, no. 6, pp. 55—58 (in Russian).
10. **Ionascu G., Bogatu L., Apostolescu T. C., Manea E., Cernica I., Morlova A.** Study of Compensation Structures for Silicon Micromachining, *IST International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics, Mechanical Engineering and New High-Tech Products Development, MECASITECH'09*, pp. 136—143.
11. **Prem Pal, Kazuo Sato.** A comprehensive review on convex and concave corners in silicon bulk micromachining based on anisotropic wet chemical etching, *Micro and Nano Systems Letters*, 2015, vol. 3, no. 6. DOI: 10.1186/s40486-015-0012-4.
12. **Pautkin V. Ye., Mishanin A. Ye.** Sposob zashchity uglov kremniyevykh mikromekhanicheskikh struktur pri anizotropnom travlenii, *Patent RF № 2667327*, MPK H01L 21/308. Zayavka № 2017129792 ot 22.08.2017.; opubl. 18.09.2017, byul. № 26. (in Russian).
13. **Vetrova Ye. V., Smirnov I. P., Kozlov D. V., Zapetlyayev V. M.** Osobennosti sozdaniya chuvstvitel'nykh elementov kremniyevykh i kvartsevnykh mayatnikovyykh akselerometrov, *Raketno-kosmicheskoye priborostroyeniye i informatsionnyye sistemy*, 2017, vol. 4, is. 2, pp. 95—102 (in Russian).
14. **Sokolov L. V., Arkhipov S. V., Shkol'nikov V. M.** Issledovaniye mekhanizma glubinnogo anizotropnogo travleniya kremniya pri formirovaniy ob'yemnykh mikromekhanicheskikh struktur v kremnii (100), *Mikroelektronika*, 2003, vol. 32, no. 3, pp. 194—201 (in Russian).
15. **Musalimov V. M., Rotts Yu. A., Astaf'yev S. A., Amvros'yeva A. V.** Raschot nadozhnosti uprugikh elementov mikromekhanicheskikh giroskopov, Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet ITMO, 2012. 127 p. (in Russian).

Рисунки к статье Камалджита Сингха, А. В. Нирмала  
«КОРПУСИРОВАНИЕ МЭМС-СТРУКТУР  
ДЛЯ РАБОТЫ В ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ»

Kamaljeet Singh, A. V. Nirmal  
«PACKAGING SOLUTIONS FOR MEMS STRUCTURES  
IN RADIO FREQUENCY DOMAIN»

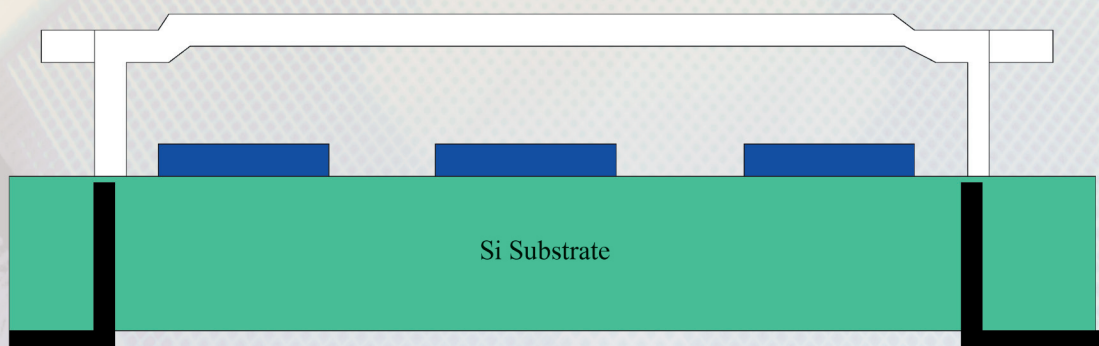


Рис. 1. Вертикальная коммутация через подложку

*Fig 1. Vertical via through substrate*

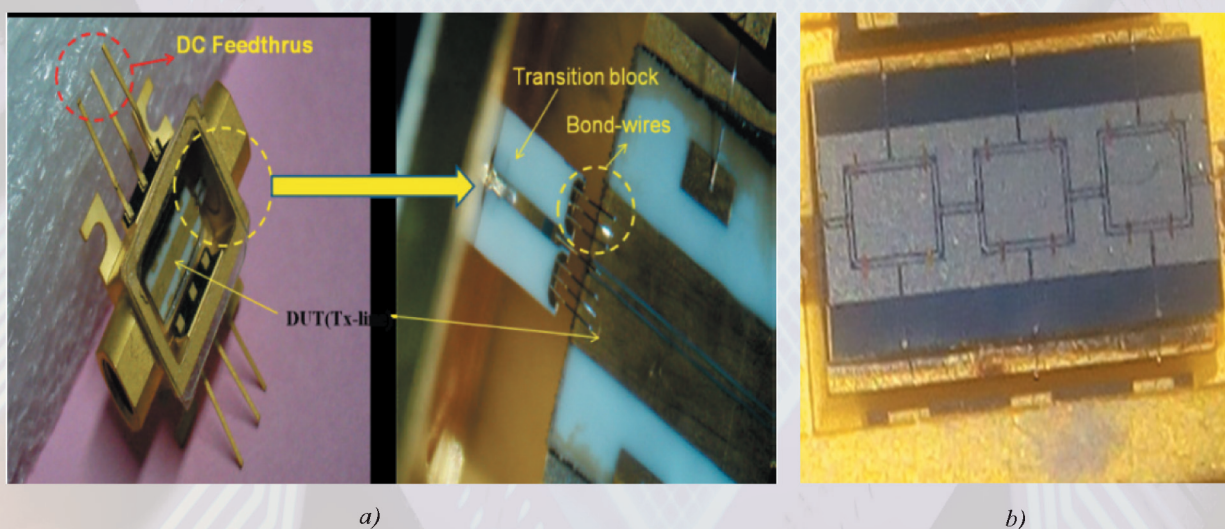


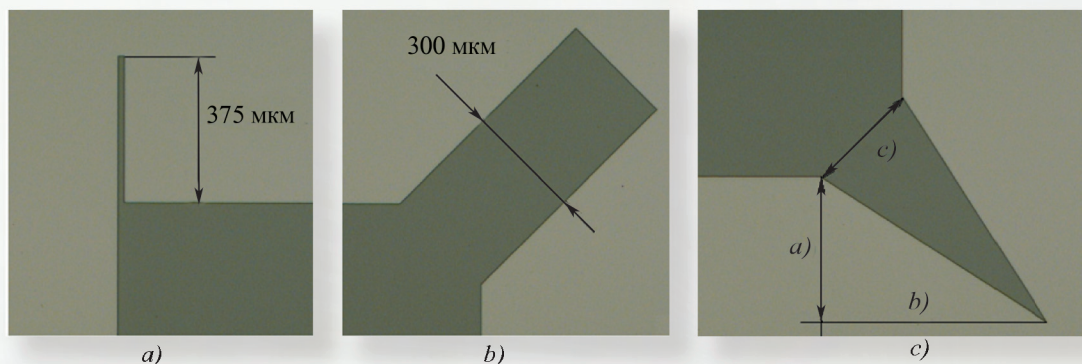
Рис. 3. Упаковка чипа (a) на CPW-линии с помощью термокомпрессионного соединения проволочных выводов [7], МЭМС-деталь, присоединенная внутри корпуса (b)

*Fig. 3. Chip packaging (a) CPW line using wire bonds [7], MEMS die attached inside the package (b)*

Рисунки к статье С. И. Торгашина, В. Е. Пауткина  
**«ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СХЕМ КОМПЕНСАЦИИ  
 УГЛОВОГО РАСТРАВЛИВАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МЭМС-СТРУКТУР»**

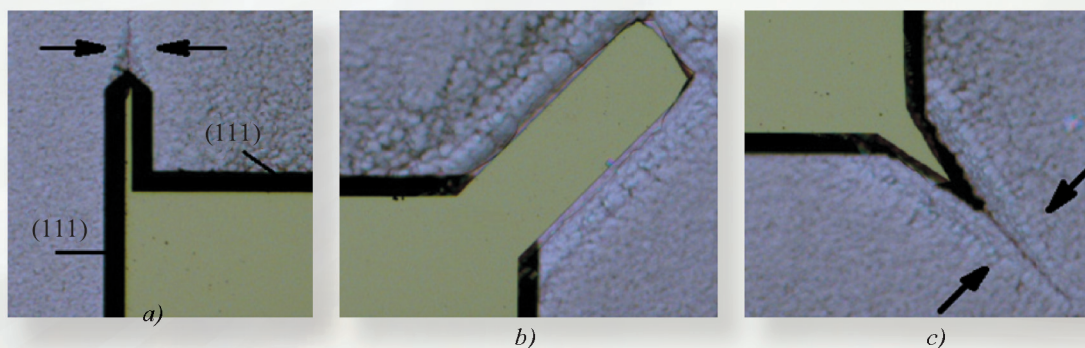
S. I. Torgashin, V. E. Pautkin

**«SPECIFIC FEATURES OF APPLICATION OF THE COMPENSATION VERSIONS  
 FOR ANGLE ETCHING DURING FORMATION OF MEMS»**



**Рис. 1. Исходная топология компенсаторов различной конфигурации:  
 a – прямоугольной формы; b – диагональный; c – треугольный**

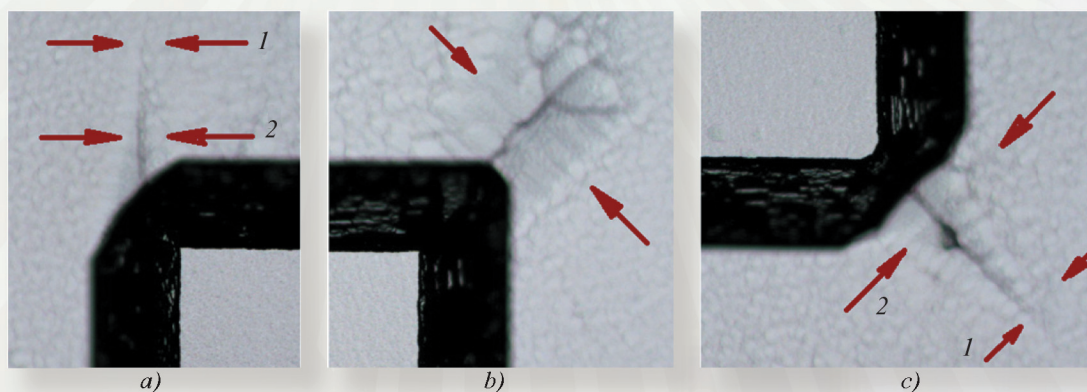
*Fig. 1. Initial topology of the compensators of various configurations:  
 a – rectangular form; b – diagonal form; c – triangular form*



**Рис. 2. Фотографии структур, протравленных на промежуточную глубину 75 мкм  
 (стрелками показано направление измерения профиля поверхности):**

*a – с компенсатором прямоугольной формы; b – с диагональным компенсатором; c – с треугольным компенсатором*

*Fig. 2. Photos of the structures etched at the intermediate depth of 75  $\mu\text{m}$  (arrows show the direction of measurement of the surface profile): a – compensator of a rectangular form; b – diagonal compensator; c – triangular compensator*



**Рис. 3. Фотографии структур, протравленных на заданную глубину 150 мкм  
 (стрелками показано направление измерения профиля поверхности):**

*a – с компенсатором прямоугольной формы; b – с диагональным компенсатором; c – с треугольным компенсатором*

*Fig. 3. Photos of the structures etched at the set depth of 150  $\mu\text{m}$  (arrows show the direction of variation of the surface profile): a – compensator of a rectangular form; b – diagonal compensator; c – triangular compensator*