

ISSN 1813-8586

# НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

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

Том 24. № 4. 2022



Рисунки к статье А. В. Наумова, Д. Л.Орехова, Н. А. Кульчицкого

«РАЗВИТИЕ МЕТОДА ЧОХРАЛЬСКОГО ДЛЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ  
В НАНО- И МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ»

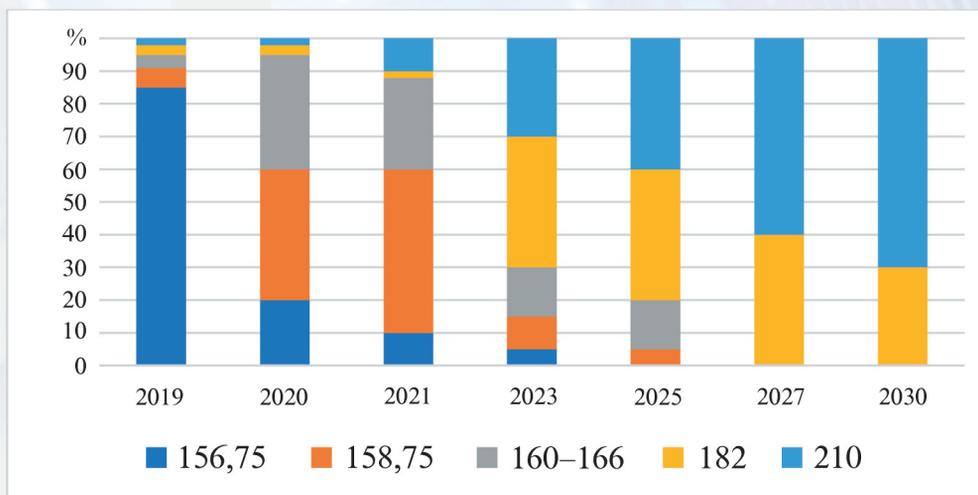


Рис. 7. Динамика и прогноз изменения размеров Si пластин для солнечных элементов

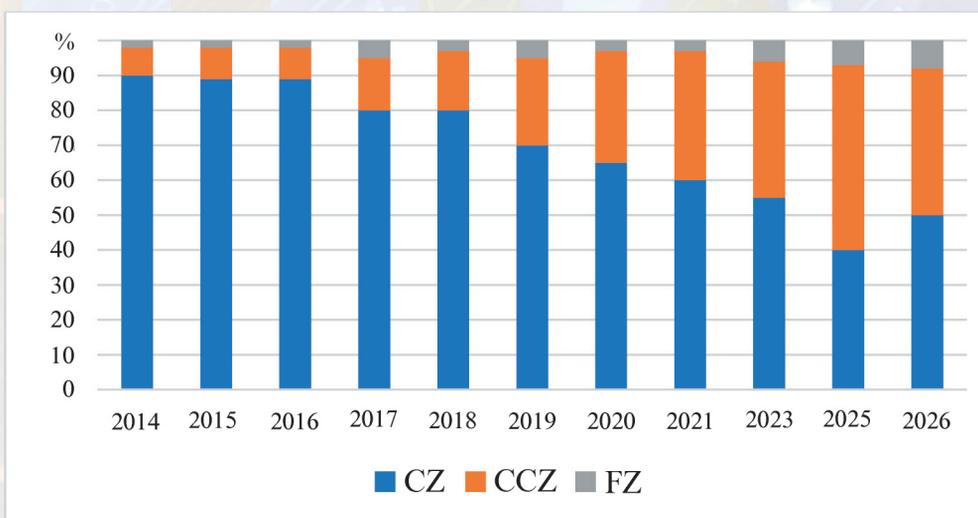


Рис. 9. Доли различных методов получения монокристаллов Si (прогнозы ITRPV 2018–2022 гг.)

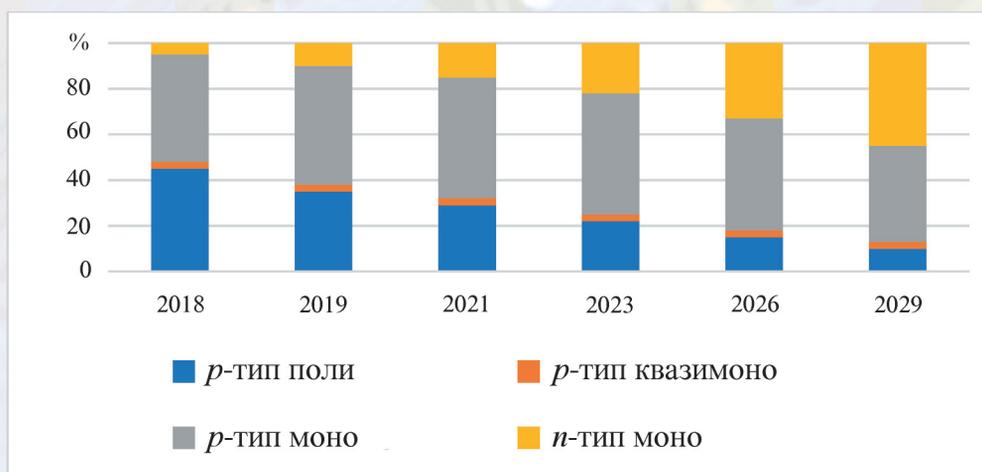


Рис. 11. Доли различных типов пластин. Структура и тип проводимости [источник-PV Tech Research]

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 24. № 4 ✧ 2022

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 научной специальности 1.4.15. Химия твердого тела и в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным специальностям 1.3.11. Физика полупроводников и 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

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

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Издается с 1999 г.

## Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

## Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

## Редакционный совет:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Редакционная коллегия:

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

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

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай)

Басаев А. С., к.ф.-м.н.

Васильев А. А., д.т.н.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Дайнеко А. В., к.х.н.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Пожеда К., д.ф.-м.н. (Литва)

Рыжий М. В., Ph.D, проф. (Япония)

Сингх К., к.т.н. (Индия)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенков С. П., д.т.н., проф.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н., доц.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

## Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Чугунова А. В. (науч. ред.)

Шетинкин Д. А. (сайт)

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Беспалов В. А., Гусев Е. Э., Дюжев Н. А., Махиборода М. А., Фоми-  
чев М. Ю. Обзор технологии адгезивного бондинга для нано- и мик-  
росистемной техники . . . . . 167

Наумов А. В., Орехов Д. Л., **Кульчицкий Н. А.** Развитие метода  
Чохральского для монокристаллического кремния в нано- и микро-  
электронике . . . . . 178

Савельев Д. В., Мусатов В. И. Новый тип магнитного материала для  
создания анизотропного магнитоэлектрического эффекта . . . . . 187

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Шаломанов В. И., Золотарев А. А. Моделирование широкополосно-  
го усилителя мощности с низким уровнем шума на элементной базе  
фаундри РФ . . . . . 193

### ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Койгеров А. С. Достижение критических и предельных параметров  
в микроприборах на поверхностных акустических волнах . . . . . 199

### БИОЭЛЕКТРОНИКА

Зимина Т. М., Пудова А. В., Мандрик И. В., Гатауллин А. О. Био-  
электрические источники энергии на основе цианобактерий . . . . . 208

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. 8(499) 270-16-52)

#### Адрес для переписки:

107076, Москва,  
ул. Матросская Тишина,  
д. 23, стр. 2, оф. 45  
e-mail: nmst@novtex.ru

#### Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

# NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 24

No. 4

2022

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

## Editorial board:

Abramov I. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (Belorussia)  
Andreev A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (UK)  
Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof.  
Baklanov M. R., Dr. Sci. (Chem.), Prof. (China)  
Basaev A. S., Cand. Sci. (Phys.-Math.)  
Dayneko A. V., Cand. Sci. (Tech.)  
Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)  
Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.  
Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Ass. Prof.  
Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Pozhela K., Dr. Sci. (Phys.-Math.) (Lithuania)  
Ryzhii M. V., Ph. D., Prof. (Japan)  
Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Singh K., PhD (India)  
Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Vasiliev A. A., Dr. Sci. (Tech.)  
Vikulin V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

## Editorial staff:

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

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

## CONTENTS

### SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

**Bespalov V. A., Gusev E. E., Djuzhev N. A., Makhboroda M. A., Fomichev M. Y.** Overview of Adhesive Bonding Technology for Nano- and Microsystem Technics . . . . . 167

**Naumov A. V., Orekhov D. L., Kulchitsky N. A.** The Recent Progress in Cz-Method for Silicon in Nano- and Micro-Electronics . . . . . 178

**Saveliev D. V., Musatov V. I.** A New Type of Magnetic Material for Anisotropic Magnetolectric Effect . . . . . 187

### MODELLING AND DESIGNING OF MNST

**Shalomanov V. I., Zolotarev A. A.** Modeling a Broadband Power Amplifier with a Low Noise on the Element Base of Foundry Russia . . . 193

### MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

**Koigerov A. S.** Achievement of Critical and Limiting Parameters in Surface Acoustic Wave Microdevices . . . . . 199

### BIOELECTRONICS

**Zimina T. M., Pudova A. V., Mandrik I. V., Gataullin A. O.** Bioelectric Energy Sources Based on Cyanobacteria . . . . . 208

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 621.3.049.76

DOI: 10.17587/nmst.24.167-177

**В. А. Беспалов**, д-р техн. наук, ректор МИЭТ, e-mail: rector@miet.ru,  
**Е. Э. Гусев**, канд. техн. наук, нач. НИЛ МС, e-mail: bubbledouble@mail.ru,  
**Н. А. Дюжев**, канд. физ.-мат. наук, директор центра ЦКП "МСТ и ЭКБ",  
e-mail: djuzhev@ckp-miet.ru, **М. А. Махиборода**, канд. физ.-мат. наук,  
директор центра НТЦ "НМСТ", e-mail: maximm@ckp-miet.ru,  
**М. Ю. Фомичев**, инженер НИЛ МС, e-mail: fomichev@ckp-miet.ru,  
Национальный исследовательский университет "МИЭТ"

## ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ АДГЕЗИВНОГО БОНДИНГА ДЛЯ НАНО- И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Поступила в редакцию 12.01.2022

*Обзор посвящен технологии адгезивного бондинга, применяемой как для изготовления различных микро- и наноэлектронных устройств, датчиков и микросистем, так и для сборки или интеграции различных компонентов. Представлены сведения о механизмах адгезивного бондинга, рассмотрены свойства различных полимеров и особенности их применения, описаны методы нанесения полимеров на поверхность пластин. Представлены схемы и принципы работы оборудования для адгезивного бондинга пластин. Приведены примеры процедур склеивания и подходящих параметров процесса бондинга как со сплошным слоем полимерного клея, так и для бондинга с полимерным клеем, сформированным в виде рисунка (селективное или локальное склеивание). В заключение сделана подборка различных применений обозреваемой технологии.*

**Ключевые слова:** адгезивный бондинг, МЭМС, КМОП, трехмерная интеграция, микросборка

### Введение

Сращивание двух полупроводниковых пластин является важным процессом в построении как микроэлектронных сборок, так и микроэлектромеханических систем (МЭМС). Эта технология также обеспечивает формирование и сборку сложных трехмерных микрокомпонентов. Исторически, одним из наиболее ранних применений бондинга пластин было изготовление и сборка датчиков давления [1, 2]. В наше время основными коммерческими применениями этой технологии являются изготовление подложек кремний на изоляторе (КНИ), микросборка инерциальных датчиков и датчиков давления для автомобилей и товаров народного потребления [3–6].

В случае адгезивного бондинга для обеспечения сращивания двух поверхностей используется промежуточный адгезивный слой. В работе [7] кратко

описаны применения адгезивного бондинга для микроэлектронных и фотонных компонентов, в основном они касаются относительно небольших областей склеивания на уровне чипа. В отличие от этих применений в недавних исследованиях и разработках в области адгезивного бондинга пластин рассматривают склеивание больших подложек с использованием хорошо сформированных и бездефектных промежуточных адгезивных слоев [8, 9]. Метод уже успешно используют во многих областях, включая авиацию, космос и машиностроение, для соединения различных одинаковых или различающихся материалов.

Наиболее часто при проведении процесса адгезивного бондинга полимерный клей наносят на одну или обе соединяемые поверхности. Далее, в некоторых применениях, пластины подвергают нагреву для задубливания нанесенного состава.

После соединения сращиваемыми поверхностями к пластинам прикладывают прижимающее давление для приведения обеих пластин в близкий контакт одновременно с их нагревом либо ультрафиолетовой засветкой, что приводит к окончательному отверждению промежуточных слоев.

К основным преимуществам адгезивного бондинга относят использование в процессе относительно низких температур (между комнатной и 450 °С, в зависимости от материала полимера), отсутствие чувствительности к наличию топологии на поверхностях соединяемых пластин, полную совместимость со стандартной технологией КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) и возможность сращивать подложки почти из любых материалов. Для проведения адгезивного бондинга не требуется специальная подготовка поверхности, такая как планаризация или тщательная очистка. Структуры и частицы на поверхностях пластин могут быть допущены и в некоторой степени компенсированы полимерным клеем. Несмотря на то, что адгезивное склеивание является сравнительно простым, надежным и недорогим процессом, необходимо учитывать такие вопросы, как ограниченные температурная стабильность и долгосрочная стабильность многих полимерных клеев в сложных условиях.

### 1. Механизмы адгезивного бондинга

Основной принцип, объединяющий все методы бондинга, заключается в том, что два материала прилипают друг к другу, если они находятся в достаточно тесном контакте. Связи атомов и молекул в твердом материале, а также адгезия атомов и молекул между двумя твердыми материалами обеспечивают четыре основных типа связей: ковалентная связь; силы Ван-дер-Ваальса; металлическая связь; ионная связь (табл. 1).

В основе этих связей лежат электромагнитные (кулоновские) силы, возникающие в результате

притяжения противоположных электрических зарядов. Ковалентные связи и силы Ван-дер-Ваальса — это основные механизмы в большинстве методов бондинга пластин. Металлические связи возникают только в металлах, так же как ионные связи появляются в ионосодержащих материалах. Для установления ковалентной или Ван-дер-Ваальсовой связи атомы двух поверхностей должны находиться на расстоянии менее 0,3...0,5 нм друг от друга. В результате возникающие связи имеют разные энергии, которые зависят как от материалов поверхностей, так и от расстояния между атомами этих поверхностей, но ни одна из связей не распространяется на расстояния более чем 0,5 нм [4]. Макроскопически плоские поверхности, такие как поверхности полированных кремниевых пластин, имеют среднюю квадратичную шероховатость 0,3...0,8 нм. Тем не менее, глубина профиля этих поверхностей составляет несколько нанометров, что обычно предотвращает склеивание на больших площадях поверхностей.

На рис. 1 схематично изображен контактный интерфейс двух плоских твердых поверхностей, однако при этом имеющих микроскопические шероховатости. Чтобы привести эти поверхности в достаточно тесный контакт для достижения склеивания, по меньшей мере одна из них должна будет деформироваться, чтобы соответствовать другой. Это может быть достигнуто пластической или упругой деформацией, диффузией твердого материала или смачиванием поверхности жидким материалом. Практически во всех методах бондинга пластин используют один из этих механизмов для установления связи между их поверхностями.

Когда используется полимерный клей для соединения двух твердых поверхностей (рис. 1, а), он деформируется и смачивает поверхности, чтобы обеспечить склеивание. Затем он должен быть окончательно отвержден, представляя собой материал, способный обеспечить силы, удерживающие поверхности вместе. Смачивание поверхностей жидким или полужидким полимерным клеем имеет решающее значение для клевого соединения.

Бондинг с полимерным клеем, как и многие другие техники, основан на том принципе, что атомы и молекулы прилипают друг к другу, когда они находятся в достаточно тесном контакте. Для возникновения между ними такой связи их необходимо приблизить друг к другу на расстояние менее 0,5 нм. На рис. 1, б схематически показана поверхность, которая не смачивается жидкостью, а на рис. 1, в — поверхность, которая смачивается жидкостью. Чтобы произошло смачивание, твердая поверхность должна иметь большую поверхностную энергию, чем жидкость. Поверхностная энергия является результатом несбалансированных сил сцепления на поверхности материала. Более высо-

Таблица 1

Сравнение энергий различных типов связей [6]

Вид связи	Энергия (кДж/моль)
Ионная связь	590...1050
Ковалентная связь	563...710
Металлическая связь	113...347
Ван-дер-Ваальсовы (межмолекулярные) связи:	
водородная связь с фтором	< 42
водородная связь без фтора	10...26
другие диполь-дипольные связи	4...21
дипольно-индуцированная дипольная связь	< 2
дисперсионная связь	0,08...42

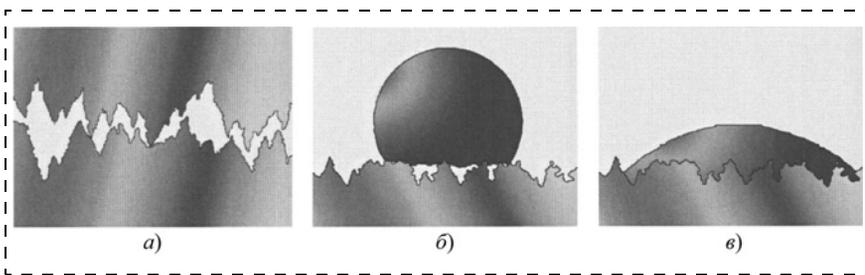


Рис. 1. Две контактирующие макроскопически плоские твердые поверхности (а), твердая поверхность, которая не смачивается жидкостью (б) и поверхность, смоченная жидкостью (в)

кая сила сцепления между атомами или молекулами материала коррелирует с более высокой поверхностной энергией. Жидкость может смачивать твердый материал только, если имеет меньшую поверхностную энергию, чем твердое тело.

Чем больше полимерный адгезив затекает в желоба профиля поверхности и заполняет их, тем лучше качество результирующего соединения и его долговременная стабильность. Полимерные клеи, имеющие низкую вязкость и низкую усадку при отверждении, обычно обеспечивают лучшее заполнение желобов профиля поверхности, что уменьшает количество незаполненного пространства на границе раздела. Небольшие молекулы, такие как молекулы воды или газа, могут оставаться и диффундировать в незаполненном пространстве в пограничном слое между клеем и поверхностью и уменьшать энергию связи или влиять на материалы в пограничном слое.

Степень смачивания поверхности жидким клеем может уменьшаться поверхностными загрязнителями, такими как слабо адсорбированные органические молекулы или конденсированная влага. На степень смачивания также может влиять микроскопический профиль поверхности и частицы пыли. Чистые и свободные от загрязнений поверхности могут быть получены с помощью процедуры очистки с использованием растворителей, окислителей, сильных кислот или оснований. Подробное обсуждение измерений поверхностной энергии и смачиваемости поверхности можно найти в работе [7].

Было предложено несколько теорий механизмов адгезивного бондинга, в том числе теория адсорбции, химическое связывание, теория диффузии, электростатическое притяжение, механическое сцепление и теория слабого пограничного слоя. Теория адсорбции связывает адгезию с межатомными и межмолекулярными силами притяжения и нашла существенную экспериментальную поддержку. В этой теории смачивание поверхности клеем является ключевым фактором при определении прочности клеевого соединения. Подробное обсуждение предложенных альтернативных теорий

механизмов адгезивного бондинга можно найти в работе [7].

## 2. Полимерные клеи

Полимеры — это большие молекулы (макромолекулы), состоящие из большого числа связанных малых молекул (мономеров). Процесс межсоединения мономеров называется полимеризацией. Специфические свойства полимеров определяются шириной молекулярных цепей (как

правило, от 0,2 до 1 нм), длиной (до нескольких сотен нанометров) и их внутренней структурой. Полимеры могут быть отнесены к четырем широким классам материалов: термопластичные; терморезистивные; эластомеры; гибридные полимеры. Термопластичные полимеры затвердевают при охлаждении и могут быть переплавлены. Терморезистивные полимеры при первом нагреве в течение короткого времени подвергаются перекрестному сшиванию с образованием трехмерной сетки и в отличие от термопластов не могут быть переплавлены или изменены. Отличительными характеристиками эластомерных материалов являются их способность выдерживать большие деформации (в 5—10 раз превышающие начальные размеры) при относительно низких напряжениях и самопроизвольно восстанавливать свою первоначальную форму без разрыва. Гибридные полимеры — это сплавы и смеси полимеров из трех предыдущих классов, образующие материалы, свойства и характеристики которых могут сильно отличаться от отдельных компонентов. Полимеры из материалов всех четырех классов могут быть использованы в качестве адгезива.

### Отверждение и полимеризация

Полимерный состав должен существовать в жидкой, полужидкой или вязкоупругой фазе во время процесса склеивания адгезива для достижения достаточно тесного контакта с поверхностями, подлежащими склеиванию. Затем клей должен быть трансформирован в твердый материал для достижения прочного сцепления. Полимерные клеи, в зависимости от механизма перехода из жидкого в твердое состояние, выделяют в три основные группы:

- полимеры, растворенные в воде или растворителях, затвердевающие при испарении воды или растворителей, называемые сушильными клеями;
- термопластичные полимеры, плавящиеся при нагревании до температуры плавления и затвердевающие при охлаждении ниже температуры плавления, называемые горячими расплавами;

- полимеры, отверждающиеся во время химических реакций, формируют более крупные молекулы или цепочки молекул из прекурсора или из жидкой фазы (например, смолы); процесс отверждения может инициироваться или поддерживаться различными механизмами, например, такими как:

- смешивание двух или более компонентов (например, двухкомпонентных эпоксидных смол);
- нагревание (для большинства термореактивных клеев и эпоксидных смол);

- освещение светом (например, для клеев, отверждаемых ультрафиолетом);

- добавление влаги (например, для некоторых полиуретанов и цианоакрилатов);

- удаление кислорода (например, для анаэробных клеев).

На практике вышеупомянутые принципы отверждения очень часто комбинируют различными способами.

### **Основные свойства полимеров**

Большинство полимеров может быть использовано в качестве клея. В продаже имеется широкий набор полимерных материалов с различными физическими и химическими свойствами. Полимеры обычно имеют хорошую адгезию к большому набору материалов подложки. Как правило, они жесткие и ломкие, но становятся мягче при нагревании.

Все полимеры растекаются под влиянием нагрузки. Значение растекания зависит как от температуры окружающей среды, так и от времени нахождения под нагрузкой. Разные полимеры имеют разный параметр нагрузки, инициирующей растекание.

Полимеры подвержены таким же воздействиям окружающей среды, как и стекла или металлы. На них влияют химические вещества, температура, радиация (ультрафиолетовое и гамма-излучения), механический стресс и биологическое разрушение и, следовательно, их свойства со временем могут меняться.

Полимеры обычно на несколько порядков более проницаемы для влаги, чем стекло или металлы. Молекулы воды размером чуть больше 0,1 нм диффундируют в свободное пространство между молекулярными цепями полимеров. Таким образом, полимеры нельзя напрямую использовать для получения герметично закрытых полостей или герметичного бондинга.

Термопластичные полимеры имеют температурный диапазон использования до 200...300 °С, ограниченный появляющейся при низких температурах хрупкостью. При нагревании термопластичные полимеры могут значительно удлиняться и деформироваться и, когда температура увеличивается еще больше, превращаются в вязкий расплав.

Обычно они имеют слабое сопротивление растеканию, но хорошо сопротивляются отслаиванию. Химическая стойкость варьируется от плохой до отличной в зависимости от полимера.

Термореактивные полимеры можно применять при температурах до 300...450 °С, они более жесткие, чем термопластичные полимеры, и, как правило, обладают лучшей химической стойкостью. Перекрестно сшитые термореактивные полимеры не могут течь, но продолжают размягчаться до тех пор, пока не произойдет разложение при воздействии повышающихся температур. Как правило, они имеют хорошее сопротивление растеканию, но показывают лишь удовлетворительное сопротивление отслаиванию.

Эластомерные полимеры можно применять в широком интервале температур примерно до 260 °С. Они имеют высокое сопротивление отслаиванию, низкую общую прочность и большую гибкость. Химическая стойкость варьируется в зависимости от эластомера.

Гибридные полимеры могут иметь свойства всех других классов адгезивных материалов, но с более сбалансированной комбинацией. Некоторые высокоэффективные полимеры, например полибензимидазолы, могут выдерживать температуры до 760 °С в течение коротких периодов времени без разрушения. Специализированные полимерные клеи могут иметь очень низкое водопоглощение и сравнительно хорошие диффузионные барьеры для влаги.

### **3. Технология адгезивного бондинга пластин**

Для большинства применений адгезивного бондинга пластин необходима хорошая воспроизводимость толщины функциональных слоев, высокая производительность и иногда точное совмещение срачиваемых пластин. Для достижения высококачественного бондинга необходимо точно контролировать такие параметры процесса склеивания, как давление прижатия, давление в камере, температура и скорость изменения температуры, так как они оказывают значительное влияние на результирующее качество склеивания и плотность дефектов [8, 9].

#### **Нанесение полимеров на поверхность пластин**

Для большинства применений адгезивного бондинга пластин в микроэлектронике и МЭМС требуется однородность толщины промежуточного связующего материала от 0,1 до 100 мкм. Существует несколько способов получения однородных полимерных слоев в этом диапазоне толщин. Наиболее распространенный метод в технологии производства микроэлектроники и МЭМС — нанесение на пластину жидкого полимерного прекурсора центрифугированием. Толщина получаемого слоя

определяется вязкостью наносимого прекурсора и скоростью вращения centrifуги. Таким образом, могут быть достигнуты очень однородные покрытия с очень точно воспроизведенной толщиной и гладкой поверхностью.

Покрытие распылением [10], электроосаждение [11], штамповка, трафаретная печать, нанесение щеткой, и нанесение поливом жидких полимерных прекурсоров — это альтернативные методы, которые относительно просты в использовании. Однако эти методы часто не позволяют обеспечивать равномерность и точное воспроизведение толщины слоев, как в случае с покрытием, полученным методом центрифугирования. Реже используемым методом нанесения тонких полимерных пленок является химическое осаждение из газовой фазы [11]. Также некоторые полимеры могут быть доступны в виде тонких пленок или листов, ламинированных на поверхность пластины.

### Оборудование для бондинга пластин и методы их сращивания

Бондер, как правило, состоит из вакуумной камеры, механизма для соединения пластин внутри камеры, держателя пластин и инструмента для бондинга. На рис. 2, а показана типичная схема такого бондера пластин. Срачиваемые пластины помещают между нижней державкой и инструментом для бондинга. Таким образом, пластины могут быть скреплены между собой инструментом для бондинга с обеспечением контроля давления. Набор пластин может быть нагрет снизу или сверху. Верхний зажимной патрон может быть жесткой плоской пластиной или жесткой плоской пластиной вместе с мягкой пластиной, либо с листом. Мягкие пластины или листы служат для лучшей адаптации к неоднородностям набора пластин и таким образом позволяют более равномерно распределять давление.

В настоящее время основными поставщиками оборудования для бондинга пластин являются *Electronic Vision Group* (Австрия) и *Karl Suss AG* (Германия). Также инструменты для ламинирования, химико-механической полировки (ХМП) и процессов шлифовки пластин предлагают фирмы *AML* (Великобритания), *Ayumi* (Япония), *Logitech* (Великобритания) и *Dynatex* (США).

Инструмент для ламинирования пластин обычно состоит из камеры низкого давления с конфоркой в виде нижнего патрона и упругой верхней мембраны, как показано на рис. 2, б. На верхнюю мембрану подается давление, оказываемое газом, и таким образом осуществляется давление на набор пластин на конфорке. В то время как инструменты для ламинирования пластин не обеспечивают точного соединения пластин и выравнивания и обычно ограничены температурами склеивания ниже

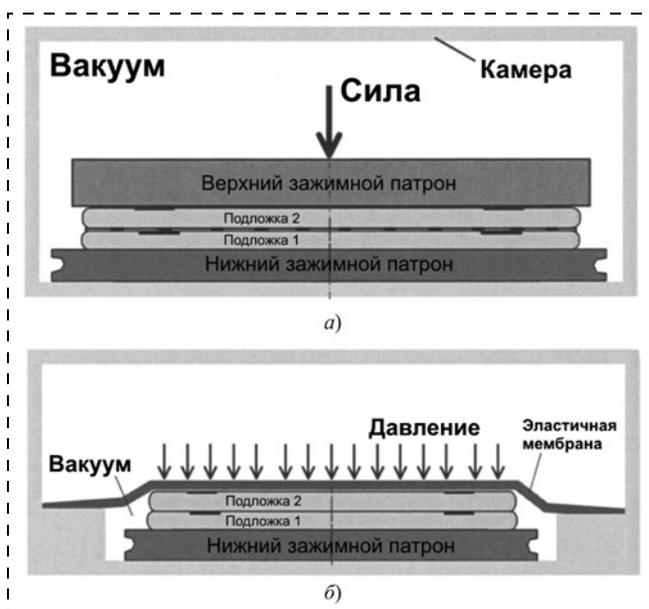


Рис. 2. Схематическое изображение бондера пластин (а) и инструмента для ламинирования пластин (б)

200 °С, их сложность и стоимость значительно ниже, чем у традиционных бондеров пластин.

Пластины из разных материалов при нагревании расширяются в разной степени. При повышении температуры на 100 °С разница в тепловом расширении двух пластин, сделанных из разных материалов, может составлять несколько десятков микрометров (например, для пластин из кремния и арсенида галлия). Чтобы точно выровнять и скрепить пластины из различных материалов, должны либо совпадать их коэффициенты температурного расширения, либо бондинг с использованием полимера необходимо проводить при температуре ниже комнатной [12, 13].

### Технологические процессы адгезивного бондинга

В табл. 2 приведена типичная схема процесса бондинга пластин с промежуточным слоем из полимерного адгезива. Технологический процесс включает использование инструмента для бондинга пластин, который обычно применяют для склеивания с термопластичными полимерными клеями и с неотвержденными (мягко спеченными) или с частично отвержденными термореактивными полимерными клеями. Схемы адгезивного бондинга пластин, в которых используется клей, отверждаемый ультрафиолетовым излучением [14, 15] или специальной активацией поверхности адгезива перед склеиванием пластин, как правило, состоят из слегка модифицированных технологических маршрутов.

На прочность сцепления и количество образующихся пустот или дефектов на границе соединения при адгезивном бондинге пластин влияют состав

Типичные этапы процесса склеивания пластин с адгезивом [13, 16]

№	Этап процесса	Назначение этапа процесса
1	Очистка и сушка пластин	Удаление частиц, загрязнений и влаги с поверхностей пластин
2	Обработка поверхностей пластин составом, улучшающим адгезию (опционально)	Улучшение адгезии между поверхностями пластин и полимерным клеем
3	Нанесение полимерного клея на поверхность одной или обеих пластин; формирование рисунка из полимерного клея (опционально)	Наиболее распространенный метод нанесения — центрифугирование
4	Мягкое задубливание или частичное отверждение полимера	Растворители и летучие вещества удаляют из полимера. Термореактивные клеи не должны полимеризоваться или могут быть только частично полимеризованы. Термопластичные клеи могут быть полностью полимеризованы, поскольку их можно переплавлять для достижения склеивания
5	Отправка пластин в камеру для бондинга, создание необходимого уровня вакуума и соединение пластин внутри камеры	Пластины соединяют в вакуумной атмосфере для предотвращения появления пустот и газов на границе раздела
6	Приложение давления на набор пластин инструментом для бондинга	Поверхность пластины и полимерного адгезива приводятся в тесный контакт по всей площади. Для термореактивных полимерных клеев давление прижатия должно быть приложено перед достижением температуры отверждения. Если используются термопластичные полимерные клеи, давление прижатия может быть применено после достижения температуры склеивания
7	Оплавление или отверждение полимерного клея при приложении давления с помощью инструмента для бондинга	Процедура отверждения зависит от механизма отверждения используемого полимерного клея. Оплавление полимерного клея обычно запускается при повышенной температуре
8	Продувка камеры, охлаждение и сброс давления	Окончание процесса бондинга

клея, материалы пластин, размер и число частиц на поверхностях пластин, топография поверхности пластин, толщина полимера, давление связывания, степень отверждения (уровень полимеризации) полимерного адгезива, толщина пластины, условия отверждения полимера и атмосферные условия в камере бондера перед соединением пластины.

#### **Адгезивный бондинг пластин с неструктурированными слоями адгезива**

В следующем примере описан процесс адгезивного бондинга пластин с покрытием из бензоциклубутена (БЦБ) сухого травления, который создает очень прочные, долговечные и бездефектные соединения. Термореактивный полимер БЦБ был выбран в этом примере потому, что он является материалом, широко используемым в полупроводниковой промышленности, а также за его превосходные свойства в качестве адгезивного материала.

Процесс адгезивного бондинга начинается с нанесения слоя БЦБ требуемой толщины на одну или обе поверхности пластины, которые должны быть склеены, методом центрифугирования. Перед нанесением покрытия БЦБ поверхность пластины можно очистить и нанести усилитель адгезии. Затем слой БЦБ подвергается мягкому задубливанию при температуре от 100 до 170 °С в течение нескольких минут для удаления растворителей. Мягкое задубливание при таких температурах лишь незначительно повышает уровень перекрестного сшивания

полимера БЦБ [13, 17, 18]. Подложки помещают на держатель пластин и отправляются в камеру для бондинга. После начала процесса бондинга форвакуумный насос откачивает воздух из камеры, устанавливая внутреннее давление порядка  $10^{-3}$  мбар. Затем инструмент для бондинга прикладывает давление срачивания около 0,2...0,5 МПа и нагревает набор пластин. Температура отверждения слоя БЦБ может быть выбрана в диапазоне между 200 и 300 °С, причем время отверждения зависит от температуры. При температуре отверждения 250 °С требуется время около 1 ч. В процессе отверждения покрытие БЦБ достигает фазы с низкой вязкостью при перекрестном сшивании, при этом очень хорошо компенсируя топографические особенности на поверхностях пластин и достигая очень прочного и долговечного срачивания [17, 18].

#### **Адгезивный бондинг пластин со структурированными слоями адгезива**

Селективный или локализованный адгезивный бондинг достигается путем нанесения полимерного адгезива только на те участки, где требуется склеивание [14, 15, 18, 20—34] или путем локального нагревания соединяемой поверхности для создания локальных сцеплений в нужных областях [35]. К методам нанесения полимерного клея только на определенные области пластин относят распыление с помощью теневой маски, локальное дозирование, трафаретную печать и штамповку жидкого полимерного прекурсора. Также альтер-

нативными подходящими способами нанесения полимерного клея только на определенные участки пластины являются нанесение рисунка путем локальной штамповки или резки струей воды, либо лазером. Все эти методы имеют ограничения, касающиеся как контроля толщины полимера, так и достижения наименьших размеров элементов формируемых областей, подлежащих либо не подлежащих склеиванию. Для создания областей, подлежащих склеиванию, с очень точными размерами промежуточный полимерный адгезив может быть сформирован с использованием фотолитографии [18, 30]. Подходящими методами являются травление полимера с помощью определенной маски или использование светочувствительных полимеров. Другими альтернативами для формирования рисунка полимера с помощью литографических методов являются процессы взрывной литографии и селективное осаждение полимера.

#### 4. Применения адгезивного бондинга пластин

Адгезивный бондинг пластин — это универсальная технология с уникальными характеристиками, ее используют для изготовления трехмерных интегральных схем (3D-ИС) [12, 13, 19, 31, 36—40] и для интеграции интегральных схем с микросистемами, такими как инфракрасные матрицы [41, 42], микрозеркальные матрицы [43—45], массивы микрочипов для систем хранения данных и лазерные системы [38, 46—50].

Адгезивный бондинг пластин также применяют для изготовления микрополостей при корпусировании [18, 24, 27], для изготовления жидкокристаллических компонентов на основе кремния [20, 21], тонкопленочных солнечных элементов [51], радиочастотных компонентов [52, 53], микротопливных элементов, микроактюаторов жесткого диска [34], биоМЭМС и микросистем полного анализа (лаборатория на чипе) [14, 15, 17, 23, 28, 30, 54—63], для сборки на уровне пластин и корпусирования электроники [33], КМОП-датчиков изображений [64], радиочастотных устройств [18, 27], МЭМС- и МОЭМС-устройств [18, 24, 27, 33].

#### Заключение

Адгезивный бондинг пластин — это КМОП-совместимая технология, предоставляющая уникальные возможности для изготовления и совершенствования микросистем. Технологические схемы и параметры адгезивного бондинга пластин со сплошными промежуточными слоями полимерных пленок и полимерными клеями с фотолитографически сформированным рисунком (локализованный адгезивный бондинг пластин) легко доступны в литературе. Основными преимуществами адгезивного бондинга пластин являются низкая чувствительность к топографии поверхности, низ-

кие температуры склеивания, совместимость со стандартными процессами обработки пластин и возможность срачивания пластин практически из любых материалов. Адгезивное срачивание пластин не требует специальной обработки их поверхности, такой как планаризация. Структуры и частицы на поверхностях пластин могут быть допущены и в некоторой степени компенсированы полимерным клеем.

Физика адгезивного бондинга пластин была тщательно исследована. В настоящее время разрабатывают различные технологии адгезивного бондинга пластин. В качестве простого, надежного и недорогого процесса адгезивный бондинг пластин можно использовать для многих применений, таких как создание 3D-ИС, сборка на уровне пластин и построение различных видов микросистем, которые могут быть интегрированы с КМОП ИС.

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП "МСТ и ЭКБ" (МИЭТ) при финансовой поддержке Минобрнауки России (№ 075-03-2020-216, 0719-2020-0017, мнемокод FSMR-2020-0017).*

#### Список литературы

1. **Gragg J. E., McCulley W. E., Newton W. B., Derington C. E.** Compensation and calibration of a monolithic four terminal silicon pressure transducer // Proceedings of IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop. 1984. P. 21—27. DOI: 10.31438/trf.hh1984.10.
2. **Petersen K., Barth P. W., Poydock J.** et al., Silicon fusion bonding for pressure sensors // Proceedings of IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop. 1988. P. 144—147. DOI: 10.1109/SOLSEN.1988.26462.
3. **Schmidt M. A.** Wafer-to-wafer bonding for microstructure formation // Proceedings of the IEEE. 1998. Vol. 86, N. 8. P. 1575—1585. DOI: 10.1109/5.704262.
4. **Tong Q.-Y., Gösele U.** Semiconductor Wafer Bonding: Science and Technology // Annual Review of Materials Science. 1998. Vol. 28. P. 215—241. DOI: 10.1146/ANNUREV.MATSCI.28.1.215.
5. **Iyer S. S., Auberton-Hervé A. J.** Silicon Wafer Bonding Technology for VLSI and MEMS // Univ. Press of Mississippi. 2002. N. 1. DOI: 10.1049/pbep001e.
6. **Alexe M., Gösele U.** Wafer Bonding Applications and Technology // Springer Science & Business Media. 2004. Vol. 75. DOI: 10.1007/978-3-662-10827-7.
7. **Yacobi B. G., Martin S., Davis K.**, et al. Adhesive bonding in microelectronics and photonics // Journal of Applied Physics. 2002. Vol. 91. P. 6227. DOI: 10.1063/1.1467950.
8. **Гусев Е. Э., Фомичев М. Ю., Махиборода М. А., Дедкова А. А.** Технология временного бондинга для формирования СВЧ МЭМС-структур // Наноиндустрия. 2020. Т. 13, № S5-2 (102). С. 556—559. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.556.559.
9. **Fomichev M. Y., Makhiboroda M. A., Djuzhev N. A.** et al. Development of Adhesive Wafer Bonding Technology // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2021. P. 2558—2562. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396080.
10. **Pham N. P., Boellaard E., Burghartz J. N., Sarro P. M.** Photoresist coating methods for the integration of novel 3-D RF microstructures // Journal of Microelectromechanical Systems. 2004. Vol. 13, N. 3. P. 491—499.

11. **Limb S. J., Labelle C. B., Gleason K. K., et al.** Growth of fluorocarbon polymer thin films with high CF<sub>2</sub> fractions and low dangling bond concentrations by thermal chemical vapor deposition // *Applied Physics Letters*. 1996. Vol. 68, N. 20. P. 2810–2812.
12. **Niklaus F., Kumar R., McMahon J.** et al. Effects of Bonding Process Parameters on Wafer-to-Wafer Alignment Accuracy in Benzocyclobutene (BCB) Dielectric Wafer Bonding // *MRS Online Proceedings Library (OPL)*. 2005. Vol. 863, B10.8. DOI: 10.1557/PROC-863-B10.8.
13. **Niklaus F., Kumar R. J., McMahon J. J.** et al. Adhesive wafer bonding using partially cured benzocyclobutene for three-dimensional integration // *Journal of the Electrochemical Society*. 2006. Vol. 153, N. 4, G291.
14. **Schlautmann S., Besselink G. A. J., Prabhu G. R., Schasfoort R. B.** Fabrication of a microfluidic chip by UV bonding at room temperature for integration of temperature-sensitive layers // *Journal of micromechanics and microengineering*. 2003. Vol. 13, N. 4, S81.
15. **Carlier J., Arscott S., Thomy V.** et al. Integrated microfluidics based on multi-layered SU-8 for mass spectrometry analysis // *Journal of micromechanics and microengineering*. 2004. Vol. 14, N. 4. P. 619.
16. **Niklaus F., Enoksson P., Kälvesten E., Stemme G.** Low-temperature full wafer adhesive bonding // *Journal of micromechanics and microengineering*. 2001. Vol. 11, N. 2. P. 100.
17. **Niklaus F., Andersson H., Enoksson P., Stemme G.** Low temperature full wafer adhesive bonding of structured wafers // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2001. Vol. 92, N. 1–3. P. 235–241.
18. **Oberhammer J., Niklaus F., Stemme G.** et al. Selective wafer-level adhesive bonding with benzocyclobutene for fabrication of cavities // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2003. Vol. 105, N. 3. P. 297–304.
19. **Kwon Y., Seok J., Lu J.-Q.** et al. Thermal cycling effects on critical adhesion energy and residual stress in benzocyclobutene-bonded wafers // *Journal of the Electrochemical Society*, 2005. Vol. 152, N. 4, G286.
20. **Kazlas P. T., Johnson K. M., McKnight D. J.** et al. Miniature liquid-crystal-on-silicon display assembly // *Optics letters*. 1998. Vol. 23, N. 12. P. 972–974.
21. **Kazlas P. T., Johnson K. M., Lee Y.-C., Hareb S.** Assembly and packaging of liquid-crystal-on-silicon displays // *Micro-Optics Integration and Assemblies*. 1998. Vol. 3289. P. 52.
22. **Glasgow I. K., Beebe D. J., White V. E.** Design rules for polyimide solvent bonding // *Sensors and materials*. 1999. Vol. 11, N. 5. P. 269.
23. **Huang Z., Sanders J. C., Dunsmore C.** et al. A method for UV-bonding in the fabrication of glass electrophoretic microchips // *Electrophoresis*. 2001. Vol. 22, N. 18. P. 3924.
24. **Pan C.-T., Yang H., Shen S.-C.** et al. A low-temperature wafer bonding technique using patternable materials // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2002. Vol. 12, N. 5. P. 611.
25. **Blanco F. J., Agirregabiria M., Garcia J.** et al. Novel three-dimensional embedded SU-8 microchannels fabricated using a low temperature full wafer adhesive bonding // *Journal of micromechanics and microengineering*. 2004. Vol. 4, N. 7. P. 1047.
26. **Blanco F. J., Agirregabiria M., Tijero M.** et al. Novel low temperature CMOS compatible full wafer bonding process for the fabrication of 3D embedded microchannels using SU-8 // *Device and Process Technologies for MEMS, Microelectronics, and Photonics III*. 2004. Vol. 5276. P. 131.
27. **Oberhammer J., Niklaus F., Stemme G.** Sealing of adhesive bonded devices on wafer level // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2004. Vol. 110, N. 1–3. P. 407.
28. **Bilenberg B., Nielsen T., Clausen B., Kristensen A.** PMMA to SU-8 bonding for polymer based lab-on-a-chip systems with integrated optics // *Journal of micromechanics and microengineering*. 2004. Vol. 14, N. 6. P. 814.
29. **Hwang T., Popa D., Jeongsik S., et al.** BCB wafer bonding for microfluidics // *Micromachining and microfabrication process technology IX*. 2004. Vol. 5342. P. 182.
30. **Svasek P., Svasek E., Lendl B., Vellekoop M.** Fabrication of miniaturized fluidic devices using SU-8 based lithography and low temperature wafer bonding // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2004. Vol. 115, N. 2–3. P. 591.
31. **Oberhammer J., Stemme G.** BCB contact printing for patterned adhesive full-wafer bonded 0-level packages // *Journal of microelectromechanical systems*. 2005. Vol. 14, N. 2. P. 419.
32. **Satyanarayana S., Karnik R. N., Majumdar A.** Stamp-and-stick room-temperature bonding technique for microdevices // *Journal of microelectromechanical systems*. 2005. Vol. 14, N. 2. P. 392.
33. **Polyakov A., Bartek M., Burghartz J. N.** Area-selective adhesive bonding using photosensitive BCB for WL CSP applications // *J. Electron. Packag.* 2005. Vol. 127, N. 1. P. 7.
34. **Chen J., Lu Y., Yang J. P.** Integrated fabrication of electrostatic microactuator for HDD R/W head positioning // *Microsystem technologies*. 2005. Vol. 11, N. 8. P. 612.
35. **Bayrashev A., Ziaie B.** Silicon wafer bonding through RF dielectric heating // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2003. Vol. 103, N. 1–2. P. 16.
36. **Sailer P. M., Singhal P., Hopwood J.** et al. Creating 3D circuits using transferred films // *IEEE Circuits and Devices Magazine*. 1997. Vol. 13, N. 6. P. 27.
37. **Matsumoto T., Satoh M., Sakuma K.** et al. New three-dimensional wafer bonding technology using the adhesive injection method // *Japanese journal of applied physics*. 1998. Vol. 37, N. 3S. P. 1217.
38. **Niklaus F., Enoksson P., Griss P.** et al. Low-temperature wafer-level transfer bonding // *Journal of microelectromechanical systems*. 2001. Vol. 10, N. 4. P. 525.
39. **Niklaus F., Enoksson P., Kälvesten E., Stemme G.** A method to maintain wafer alignment precision during adhesive wafer bonding // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2003. Vol. 107, N. 3. P. 273.
40. **Kwon Y., Jindal A., McMahon J. J.** et al. Dielectric Glue-Wafer Bonding For 3D Ics // *MRS Online Proceedings Library (OPL)*. 2003. Vol. 766. P. 21–27.
41. **Niklaus F., Kälvesten E., Stemme G.** Wafer-level membrane transfer bonding of polycrystalline silicon bolometers for use in infrared focal plane arrays // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2001. Vol. 11, N. 5. P. 509.
42. **Niklaus F., Pejnefors J., Dainese M.** et al. Characterization of transfer-bonded silicon bolometer arrays // *Infrared Technology and Applications XXX*. 2004. Vol. 5406. P. 521.
43. **Su G.-D. J., Toshiyoshi H., Wu M. C.** Surface-micromachined 2-D optical scanners with high-performance single-crystalline silicon micromirrors // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2001. Vol. 13, N. 6. P. 606.
44. **Niklaus F., Haas S., Stemme G.** Arrays of monocrystalline silicon micromirrors fabricated using CMOS compatible transfer bonding // *Journal of microelectromechanical systems*. 2003. Vol. 12, N. 4. P. 465.
45. **Choi Y.-S., Park J.-S., Park H.-D.** et al. Effects of temperatures on microstructures and bonding strengths of Si–Si bonding using bisbenzocyclobutene // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2003. Vol. 108, N. 1–3. P. 201.
46. **Matsuo S., Nakahara T., Tateno K.** et al. Novel technology for hybrid integration of photonic and electronic circuits // *IEEE Photonics Technology Letters*. 1996. Vol. 8, N. 11. P. 1507.
47. **Matsuo S., Tateno K., Nakahara T.** et al. Use of polyimide bonding for hybrid integration of a vertical cavity surface emitting laser on a silicon substrate // *Electronics Letters*. 1997. Vol. 33, N. 13. P. 1148.

48. **Ma Y., Chang G., Park S.** et al. InGaAsP thin-film microdisk resonators fabricated by polymer wafer bonding for wavelength add-drop filters // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2000. Vol. 12, N. 11. P. 1495.
49. **Huang Z., Sanders J. C., Dunsmor C.** et al. A method for UV-bonding in the fabrication of glass electrophoretic microchips // *Electrophoresis*. 2001. Vol. 22, N. 18. P. 3924.
50. **Katsnelson A., Tokranov V. E., Yakimov M.** et al. Hybrid integration of III-V optoelectronic devices on Si platform using BCB // *Photonics Packaging and Integration III*. 2003. Vol. 4997. P. 198.
51. **Takato H., Shimokawa R.** Thin-film silicon solar cells using an adhesive bonding technique // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2001. Vol. 48, N. 9. P. 2090.
52. **Groen S., Rosmeulen M., Baert K.** et al. Substrate bonding techniques for CMOS processed wafers // *Journal of Micro-mechanics and Microengineering*. 1997. Vol. 7, N. 3. P. 108.
53. **Coquet P., Sauleau R., Shinohara K.** et al. Multi-layer microstrip antennas on quartz substrates: Technological considerations and performances at 60 GHz // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2004. Vol. 40, N. 1. P. 41.
54. **Jackman R. J., Floyd T. M., Ghodssi R.** et al. Microfluidic systems with on-line UV detection fabricated in photodefinable epoxy // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2001. Vol. 11, N. 3. P. 263.
55. **Andersson H., Wijngaart W., Griss P.** et al. Hydrophobic valves of plasma deposited octafluorocyclobutane in DRIE channels // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2001. Vol. 75, N. 1–2. P. 136.
56. **Blanco F. J., Agirregabiria M., Garcia J.** et al. Novel three-dimensional embedded SU-8 microchannels fabricated using a low temperature full wafer adhesive bonding // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2004. Vol. 4. P. 1047. DOI: 10.1088/0960-1317/14/7/027.
57. **Francisco J. B., Maria A., Maria T.** et al. Novel low-temperature CMOS-compatible full-wafer-bonding process for the fabrication of 3D embedded microchannels using SU-8 // *Proc. SPIE*. 2004. Vol. 5276. P. 131. DOI: 10.1117/12.522287.
58. **Kloter U., Schmid H., Wolf H.** et al. High-resolution patterning and transfer of thin PDMS films: Fabrication of hybrid self-sealing 3D microfluidic systems // *IEEE Proceedings of MEMS*. 2004. P. 745–748. DOI: 10.1109/MEMS.2004.1290692.
59. **Noh H. S., Huang Y., Hesketh P. J.** Parylene micromolding, a rapid and low-cost fabrication method for parylene microchannel // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2004. Vol. 102, N. 1. P. 78, DOI: 10.1016/j.snb.2003.09.038.
60. **Hong R. H., Han P., Chen H. Y.** et al. PMMA-based capillary electrophoresis electrochemical detection microchip fabrication // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2004. Vol. 15, N. 1. P. 6, DOI: 10.1088/0960-1317/15/1/002.
61. **Tuomikoski S., Franssila S.** Free-standing SU-8 microfluidic chips by adhesive bonding and release etching // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2005, Vol. 120. N. 2. P. 408. DOI: 10.1016/j.sna.2005.01.012.
62. **Kwon J. W., Kamal-Bahl S., Kim E. S.** Film transfer and bonding technique to cover lab on a chip // *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*. 2005. Vol. 1. P. 940–943. DOI: 10.1109/SENSOR.2005.1496573.
63. **Lin C.-H., Fu L.-M., Tsai C.-H.** et al. Low azeotropic solvent sealing of PMMA microfluidic devices // *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*. 2005. Vol. 1. P. 944–947.
64. **Badihi A.** Ultrathin wafer level chip size package // *IEEE Transactions on Advanced Packaging*. 2000. Vol. 23, N. 2. P. 212. DOI: 10.1109/6040.846636.

**V. A. Bespalov**, D. S., Rector, e-mail: rector@miet.ru, **E. E. Gusev**, Ph. D., Head of Laboratory, e-mail: bubbledouble@mail.ru, **N. A. Djuzhev**, Ph. D., Director, e-mail: djuzhev@ckp-miet.ru, **M. A. Makhboroda**, Ph. D., Director, e-mail: maximm@ckp-miet.ru, **M. Y. Fomichev**, Engineer, e-mail: fomichev@ckp-miet.ru  
National Research University of Electronic Technology  
Zelenograd, Moscow, 124498, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Fomichev Michael Y.**, Engineer, National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Moscow, 124498, Russian Federation  
e-mail: fomichev@ckp-miet.ru

## Overview of Adhesive Bonding Technology for Nano- and Microsystem Technics

*Received on January 12, 2022*

*Accepted on April 1, 2022*

*The review focuses on adhesive bonding technology, which is used both for manufacturing various micro- and nanoelectronic devices, sensors and microsystems, and for assembling or integrating various components. Information on the theory of adhesive bonding mechanisms is presented. The properties and applications of four classes of polymers are reviewed: thermoplastic, thermosetting, elastomeric, and hybrid. The classification of different mechanisms used to initialize the curing process of adhesives is presented. Existing methods of applying polymers to the wafer surface are described. The main types of designs and principles of operation of adhesive wafer bonding equipment are presented, as well as its main suppliers. Examples of procedures and suitable process parameters are given for both wafer bonding with a continuous layer of adhesive and wafer bonding with patterned adhesive layers (also called selective or local bonding). The conditions required to improve the quality of the adhesive bond and to reduce the density of defects are specified, including cases of bonding wafers made from different materials.*

Adhesive wafer bonding is used for the fabrication of three-dimensional integrated circuits, and for the integration of integrated circuits with microsystems such as infrared focal plane arrays, spatial light modulators (micromirror arrays), microtip arrays for data storage systems, and laser systems. Adhesive wafer bonding is also used for the fabrication of microcavities in packaging applications, for manufacturing of liquid crystal on silicon (LcoS) components, for thin-film solar cells, for radiofrequency components, for microfuel cells, for hard disk drive microactuators, for the bioMEMS and micrototal analysis systems.

**Keywords:** adhesive bonding, MEMS, CMOS, 3D integration, microassembly

For citation:

**Bespalov V. A., Gusev E. E., Djuzhev N. A., Makhboroda M. A., Fomichev M. Y.** Overview of Adhesive Bonding Technology for Nano- and Microsystem Technics, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 167–177.

DOI: 10.17587/nmst.24.167-177

## References

1. **Gragg J. E., McCulley W. E., Newton W. B., Der- rington C. E.** Compensation and calibration of a monolithic four terminal silicon pressure transducer, *Proceedings of IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop*, 1984, pp. 21–27. DOI: 10.31438/trf.hh1984.10.
2. **Petersen K., Barth P. W., Poydock J.** et al. Silicon fusion bonding for pressure sensors, *Proceedings of IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop*, 1988, pp. 144–147. DOI: 10.1109/SOLSEN.1988.26462.
3. **Schmidt M. A.** Wafer-to-wafer bonding for microstructure formation, *Proceedings of the IEEE*, 1998, vol. 86, no. 8, pp. 1575–1585. DOI: 10.1109/5.704262.
4. **Tong Q.-Y., Gösele U.** Semiconductor Wafer Bonding: Science and Technology, *Annual Review of Materials Science*, 1998, vol. 28, pp. 215–241. DOI: 10.1146/ANNUREV.MATS- CI.28.1.215.
5. **Iyer S. S., Auberton-Hervé A. J.** Silicon Wafer Bonding Technology for VLSI and MEMS, *Univ. Press of Mississippi*, 2002, no. 1. DOI: 10.1049/pbep001e.
6. **Alexe M., Gösele U.** Wafer Bonding Applications and Technology, *Springer Science & Business Media*, 2004, vol. 75. DOI: 10.1007/978-3-662-10827-7.
7. **Yacobi B. G., Martin S., Davis K.,** et al. Adhesive bonding in microelectronics and photonics, *Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 91, p. 6227. DOI: 10.1063/1.1467950.
8. **Gusev E. E., Fomichev M. Y., Makhboroda M. A., Ded- kova A. A.** Tekhnologiya vremennogo bondinga dlya formirovaniya SVCH MEMS-struktur, *Nanoindustriya*, 2020, vol. 13, no. S5-2 (102), pp. 556–559. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.S5.556.559 (in Russian).
9. **Fomichev M. Y., Makhboroda M. A., Djuzhev N. A.** et al. Development of Adhesive Wafer Bonding Technology, *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2021, pp. 2558–2562. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396080.
10. **Pham N. P., Boellaard E., Burghartz J. N., Sarro P. M.** Photoresist coating methods for the integration of novel 3-D RF microstructures, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2004, vol. 13, no. 3, pp. 491–499.
11. **Limb S. J., Labelle C. B., Gleason K. K.,** et al. Growth of fluorocarbon polymer thin films with high CF<sub>2</sub> fractions and low dangling bond concentrations by thermal chemical vapor deposition, *Applied Physics Letters*, 1996, vol. 68, no. 20, pp. 2810–2812.
12. **Niklaus F., Kumar R., McMahon J.** et al. Effects of Bonding Process Parameters on Wafer-to-Wafer Alignment Accuracy in Benzocyclobutene (BCB) Dielectric Wafer Bonding, *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 2005, vol. 863, B10.8. DOI: 10.1557/PROC-863-B10.8.
13. **Niklaus F., Kumar R. J., McMahon J. J.** et al. Adhesive wafer bonding using partially cured benzocyclobutene for three-dimensional integration, *Journal of the Electrochemical Society*, 2006, vol. 153, no. 4, G291.
14. **Schlautmann S., Besselink G. A. J., Prabhu G. R., Schas- foort R. B.** Fabrication of a microfluidic chip by UV bonding at room temperature for integration of temperature-sensitive layers, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2003, vol. 13, no. 4, S81.
15. **Carlier J., Arscott S., Thomy V.** et al. Integrated micro- fluidics based on multi-layered SU-8 for mass spectrometry analysis, *Journal of micromechanics and Microengineering*, 2004, vol. 14, no. 4, p. 619.
16. **Niklaus F., Enoksson P., Kälvesten E., Stemme G.** Low- temperature full wafer adhesive bonding, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2001, vol. 11, no. 2, p. 100.
17. **Niklaus F., Andersson H., Enoksson P., Stemme G.** Low temperature full wafer adhesive bonding of structured wafers, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, vol. 92, no. 1–3, pp. 235–241.
18. **Oberhammer J., Niklaus F., Stemme G.** et al. Selective wafer-level adhesive bonding with benzocyclobutene for fabrica- tion of cavities, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, vol. 105, no. 3, pp. 297–304.
19. **Kwon Y., Seok J., Lu J.-Q.** et al. Thermal cycling effects on critical adhesion energy and residual stress in benzocy- clobutene-bonded wafers, *Journal of the Electrochemical Society*, 2005, vol. 152, no. 4, G286.
20. **Kazlas P. T., Johnson K. M., McKnight D. J.** et al. Min- iature liquid-crystal-on-silicon display assembly, *Optics letters*, 1998, vol. 23, no. 12, pp. 972–974.
21. **Kazlas P. T., Johnson K. M., Lee Y.-C., Hareb S.** As- sembly and packaging of liquid-crystal-on-silicon displays, *Micro- Optics Integration and Assemblies*, 1998, vol. 3289, p. 52.
22. **Glasgow I. K., Beebe D. J., White V. E.** Design rules for polyimide solvent bonding, *Sensors and materials*, 1999, vol. 11, no. 5, p. 269.
23. **Huang Z., Sanders J. C., Dunsmor C.** et al. A method for UV-bonding in the fabrication of glass electrophoretic micro- chips, *Electrophoresis*, 2001, vol. 22, no. 18, p. 3924.
24. **Pan C.-T., Yang H., Shen S.-C.** et al. A low-temperature wafer bonding technique using patternable materials, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2002, vol. 12, no. 5, p. 611.
25. **Blanco F. J., Agirregabiria M., Garcia J.** et al. Novel three-dimensional embedded SU-8 microchannels fabricated using a low temperature full wafer adhesive bonding, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, vol. 4, no. 7, p. 1047.
26. **Blanco F. J., Agirregabiria M., Tijero M.** et al. Novel low temperature CMOS compatible full wafer bonding process for the fabrication of 3D embedded microchannels using SU-8, *Device and Process Technologies for MEMS, Microelectronics, and Photonics III*, 2004, vol. 5276, p. 131.

27. **Oberhammer J., Niklaus F., Stemme G.** Sealing of adhesive bonded devices on wafer level, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, vol. 110, no. 1–3, p. 407.
28. **Bilenberg B., Nielsen T., Clausen B., Kristensen A.** PMMA to SU-8 bonding for polymer based lab-on-a-chip systems with integrated optics, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, vol. 14, no. 6, p. 814.
29. **Hwang T., Popa D., Jeongsik S., et al.** BCB wafer bonding for microfluidics, *Micromachining and microfabrication process technology IX*, 2004, vol. 5342, p. 182.
30. **Svasek P., Svasek E., Lendl B., Vellekoop M.** Fabrication of miniaturized fluidic devices using SU-8 based lithography and low temperature wafer bonding, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, vol. 115, no. 2–3, p. 591.
31. **Oberhammer J., Stemme G.** BCB contact printing for patterned adhesive full-wafer bonded 0-level packages, *Journal of Microelectromechanical systems*, 2005, vol. 14, no. 2, p. 419.
32. **Satyanarayana S., Karnik R. N., Majumdar A.** Stamp-and-stick room-temperature bonding technique for microdevices, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2005, vol. 14, no. 2, p. 392.
33. **Polyakov A., Bartek M., Burghartz J. N.** Area-selective adhesive bonding using photosensitive BCB for WL CSP applications, *J. Electron. Packag.*, 2005, vol. 127, no. 1, p. 7.
34. **Chen J., Lu Y., Yang J. P.** Integrated fabrication of electrostatic microactuator for HDD R/W head positioning, *Microsystem Technologies*, 2005, vol. 11, no. 8, p. 612.
35. **Bayrashev A., Ziaie B.** Silicon wafer bonding through RF dielectric heating, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, vol. 103, no. 1–2, p. 16.
36. **Sailer P. M., Singhal P., Hopwood J. et al.** Creating 3D circuits using transferred films, *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 1997, vol. 13, no. 6, p. 27.
37. **Matsumoto T., Satoh M., Sakuma K. et al.** New three-dimensional wafer bonding technology using the adhesive injection method, *Japanese journal of applied physics*, 1998, vol. 37, no. 3S, p. 1217.
38. **Niklaus F., Enoksson P., Griss P. et al.** Low-temperature wafer-level transfer bonding, *Journal of microelectromechanical systems*, 2001, vol. 10, no. 4, p. 525.
39. **Niklaus F., Enoksson P., Kälvesten E., Stemme G.** A method to maintain wafer alignment precision during adhesive wafer bonding, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, vol. 107, no. 3, p. 273.
40. **Kwon Y., Jindal A., McMahon J. J. et al.** Dielectric Glue-Wafer Bonding For 3D ICs, *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 2003, vol. 766, pp. 21–27.
41. **Niklaus F., Kälvesten E., Stemme G.** Wafer-level membrane transfer bonding of polycrystalline silicon bolometers for use in infrared focal plane arrays, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2001, vol. 11, no. 5, p. 509.
42. **Niklaus F., Pejnefors J., Dainese M. et al.** Characterization of transfer-bonded silicon bolometer arrays, *Infrared Technology and Applications XXX*, 2004, vol. 5406, p. 521.
43. **Su G.-D. J., Toshiyoshi H., Wu M. C.** Surface-micromachined 2-D optical scanners with high-performance single-crystalline silicon micromirrors, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, vol. 13, no. 6, p. 606.
44. **Niklaus F., Haasl S., Stemme G.** Arrays of monocrystalline silicon micromirrors fabricated using CMOS compatible transfer bonding, *Journal of Microelectromechanical systems*, 2003, vol. 12, no. 4, p. 465.
45. **Choi Y.-S., Park J.-S., Park H.-D. et al.** Effects of temperatures on microstructures and bonding strengths of Si–Si bonding using bisbenzocyclobutene, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, vol. 108, no. 1–3, p. 201.
46. **Matsuo S., Nakahara T., Tateno K. et al.** Novel technology for hybrid integration of photonic and electronic circuits, *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, vol. 8, no. 11, p. 1507.
47. **Matsuo S., Tateno K., Nakahara T. et al.** Use of polyimide bonding for hybrid integration of a vertical cavity surface emitting laser on a silicon substrate, *Electronics Letters*, 1997, vol. 33, no. 13, p. 1148.
48. **Ma Y., Chang G., Park S. et al.** InGaAsP thin-film microdisk resonators fabricated by polymer wafer bonding for wavelength add-drop filters, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 11, p. 1495.
49. **Huang Z., Sanders J. C., Dunsmor C. et al.** A method for UV-bonding in the fabrication of glass electrophoretic microchips, *Electrophoresis*, 2001, vol. 22, no. 18, pp. 3924.
50. **Katsnelson A., Tokranov V. E., Yakimov M. et al.** Hybrid integration of III-V optoelectronic devices on Si platform using BCB, *Photonics Packaging and Integration III*, 2003, vol. 4997, p. 198.
51. **Takato H., Shimokawa R.** Thin-film silicon solar cells using an adhesive bonding technique, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, vol. 48, no. 9, p. 2090.
52. **Groen S., Rosmeulen M., Baert K. et al.** Substrate bonding techniques for CMOS processed wafers, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1997, vol. 7, no. 3, p. 108.
53. **Coquet P., Sauleau R., Shinohara K. et al.** Multi-layer microstrip antennas on quartz substrates: Technological considerations and performances at 60 GHz, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, vol. 40, no. 1, p. 41.
54. **Jackman R. J., Floyd T. M., Ghodssi R. et al.** Microfluidic systems with on-line UV detection fabricated in photodefinable epoxy, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2001, vol. 11, no. 3, p. 263.
55. **Andersson H., Wijngaart W., Griss P. et al.** Hydrophobic valves of plasma deposited octafluorocyclobutane in DRIE channels, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2001, vol. 75, no. 1–2, p. 136.
56. **Blanco F. J., Agirregabiria M., Garcia J. et al.** Novel three-dimensional embedded SU-8 microchannels fabricated using a low temperature full wafer adhesive bonding, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, vol. 4, p. 1047. DOI: 10.1088/0960-1317/14/7/027.
57. **Francisco J. B., Maria A., Maria T. et al.** Novel low-temperature CMOS-compatible full-wafer-bonding process for the fabrication of 3D embedded microchannels using SU-8, *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5276, p. 131. DOI: 10.1117/12.522287.
58. **Kloter U., Schmid H., Wolf H. et al.** High-resolution patterning and transfer of thin PDMS films: Fabrication of hybrid self-sealing 3D microfluidic systems, *IEEE Proceedings of MEMS*, 2004, pp. 745–748. DOI: 10.1109/MEMS.2004.1290692.
59. **Noha H. S., Huangb Y., Hesketh P. J.** Parylene micro-molding, a rapid and low-cost fabrication method for parylene microchannel, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2004, vol. 102, no. 1, p. 78. DOI: 10.1016/j.snb.2003.09.038.
60. **Horng R. H., Han P., Chen H. Y. et al.** PMMA-based capillary electrophoresis electrochemical detection microchip fabrication, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, vol. 15, no. 1, p. 6. DOI: 10.1088/0960-1317/15/1/002.
61. **Tuomikoski S., Franssila S.** Free-standing SU-8 microfluidic chips by adhesive bonding and release etching, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, vol. 120, no. 2, p. 408. DOI: 10.1016/j.sna.2005.01.012.
62. **Kwon J. W., Kamal-Bahl S., Kim E. S.** Film transfer and bonding technique to cover lab on a chip, *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 2005, vol. 1, pp. 940–943. DOI: 10.1109/SENSOR.2005.1496573.
63. **Lin C.-H., Fu L.-M., Tsai C.-H. et al.** Low azeotropic solvent sealing of PMMA microfluidic devices, *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 2005, vol. 1, pp. 944–947.
64. **Badihi A.** Ultrathin wafer level chip size package, *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2000, vol. 23, no. 2, p. 212. DOI: 10.1109/6040.846636.

А. В. Наумов<sup>1</sup>, руководитель направления, naumov\_arkadii@mail.ru,

Д. Л. Орехов<sup>2</sup>, канд. техн. наук, ген. директор,

Н. А. Кульчицкий<sup>3,4</sup>, д-р техн. наук, проф., зам. нач. управления,

<sup>1</sup> Акционерное общество "Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон", Лыткарино, Московская обл., 140080,

<sup>2</sup> Общество с ограниченной ответственностью "НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике", Санкт-Петербург,

<sup>3</sup> Государственный научный центр РФ, Акционерное общество "Научно производственное объединение "Орион", Москва, 111538

<sup>4</sup> МИРЭА — Российский технологический университет, (РТУ МИРЭА), Россия, Москва, 119454

## РАЗВИТИЕ МЕТОДА ЧОХРАЛЬСКОГО ДЛЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ В НАНО- И МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Поступила в редакцию 18 марта 2022 г.

*Рассмотрено текущее состояние и перспективы развития мировых и российского рынков полупроводникового монокристаллического солнечного и электронного кремния, получаемого методом Чохральского. Рост потребности в микроэлектронике, провозглашенный всеми правительствами "зеленый поворот" в энергетике и восстановление цен до инвестиционно-привлекательного уровня способствовали появлению новых проектов. Развитие отечественной кремниевой микроэлектроники в свете известных событий становится насущной необходимостью. Отечественная солнечная энергетика также приблизилась к порогу, который делает рентабельным реализацию всей технологической цепочки производства.*

**Ключевые слова:** нано- и микроэлектроника, солнечная энергетика, метод Чохральского, спрос, предложение, баланс

### Введение

Монокристаллический кремний, полученный методом Чохральского, является основой современной нано- и микроэлектроники, а также солнечной энергетики, более чем на 90 %. В работе проанализированы некоторые аспекты развития промышленного производства монокристаллического кремния методом Чохральского (Cz-Si).

Общая ситуация такова.

*Нано- и микроэлектроника.* До начала пандемии COVID-19 полупроводниковая промышленность росла примерно на 5 % в год. Коронавирус нарушил работу цепочек поставок и привел к появлению дефицита чипов. На это наслонились не связанные с эпидемией негативные политические и природные факторы. Глобальный дефицит микросхем ударил по всем отраслям — от бытовой электроники до автопроизводителей. Это привело к тому, что Европа, США и Китай разработали национальные проекты, чтобы поддержать своих поставщиков и стимулировать "домашнее" производство микросхем. Спрос в 2021 г. вырос на 20 % по сравнению с 2020 г. Продажи выросли вслед за спросом. По данным SEMI и SIA рынок продаж всех

чипов достиг объема 555,9 млрд дол., увеличившись на 26,2 % в годовом исчислении. В 2022 г. продажи, как ожидается, вырастут на 8,8 %. В натуральном исчислении 2021 г. стал первым периодом с 2018 г., когда число проданных чипов превысило 1 трлн шт. Всего было поставлено более 1,15 трлн шт. полупроводниковых устройств. Растут также капитальные вложения в отрасль. После 36-процентного роста в 2021 г. капитальные вложения в полупроводниковой отрасли в 2022 г. увеличатся на 24 % и достигнут нового максимума в 190,4 млрд дол. (IC Insights), что на 86 % превосходит бюджет капитальных затрат 2019 г. — 102,5 млрд дол. Ожидается, что суммарные капитальные расходы в полупроводниковой отрасли в 2021 и 2022 годах превысят 344 млрд дол.

Таким образом, полупроводниковый сектор нано- и микроэлектроники перешел в фазу активного наращивания производственных мощностей [1].

*Солнечная энергетика.* За последние 15 лет солнечная энергетика продемонстрировала уникальные темпы роста. При этом в последние 5—7 лет по всей технологической цепочке предложение превышало спрос, что привело к периоду господства низких цен и активного внедрения продуктов сол-

нечной энергетики. В настоящее время профицит мощностей сохраняется, но по ряду общеэкономических причин солнечная энергетика продолжает наращивание мощностей.

Нам представляется, что в целом мировой полупроводниковый кремниевый сектор переходит в новую фазу развития. На это наслаиваются известные политические события, связанные с российскими рынками, что делает необходимым перевод российского полупроводникового рынка для нано- и микроэлектроники в новую фазу развития.

### Тенденции развития метода Чохральского в мире

Монокристаллы кремния для солнечной энергетики и микроэлектроники выращивают из расплава по методу Чохральского, который относится к методам направленной кристаллизации и заключается в вытягивании из расплава заправки вместе с растущим на ней монокристаллом. Расплав кремния находится в кварцевом тигле. Резистивный нагреватель и подставка для кварцевого тигля изготовлены из графита, а тепловые экраны — из материалов на основе графита [2]. Одно из преимуществ метода — возможность получения бездислокационных монокристаллов с правильной ориентацией, упорядоченной кристаллической структурой, определенными оптическими и электрическими параметрами, высокой чистотой монокристалла и другими свойствами. Вытягивание монокристалла в свободном пространстве позволяет минимизировать нарушения структуры его кристаллической решетки. Вращение заправки и тигля в разные стороны позволяет оптимизировать массообмен в расплаве и сократить нерегулярную конвекцию и концентрационное переохлаждение в расплаве, влияющие на формирование структуры монокристалла и адсорбцию примесей (рис. 1) [3].

#### Метод Чохральского в микроэлектронике

Одна из основных проблем, всегда стоящих перед микроэлектроникой, связана с требованием увеличения количества

обрабатываемой информации путем создания интегральных схем (ИС), обеспечивающих увеличение степени интеграции на одном кристалле. Поэтому рост диаметров кристаллов, используемых в промышленности, шел постоянно с момента рождения отрасли (рис. 2) [4].

Сегодня флэш-память DRAM, NAND, датчики изображений, устройства управления питанием, ЦП, графические процессоры, как правило, созданы на основе 300-миллиметровых пластин. Пластины диаметром 200 мм используют для небольших производств, где ожидаются меньшие общие объемы. Основные компании-производители пластин: SUMCO CORPORATION, Siltronic AG, Shin-Etsu Chemical Co, SK SILTRON, SunEdison Semi-

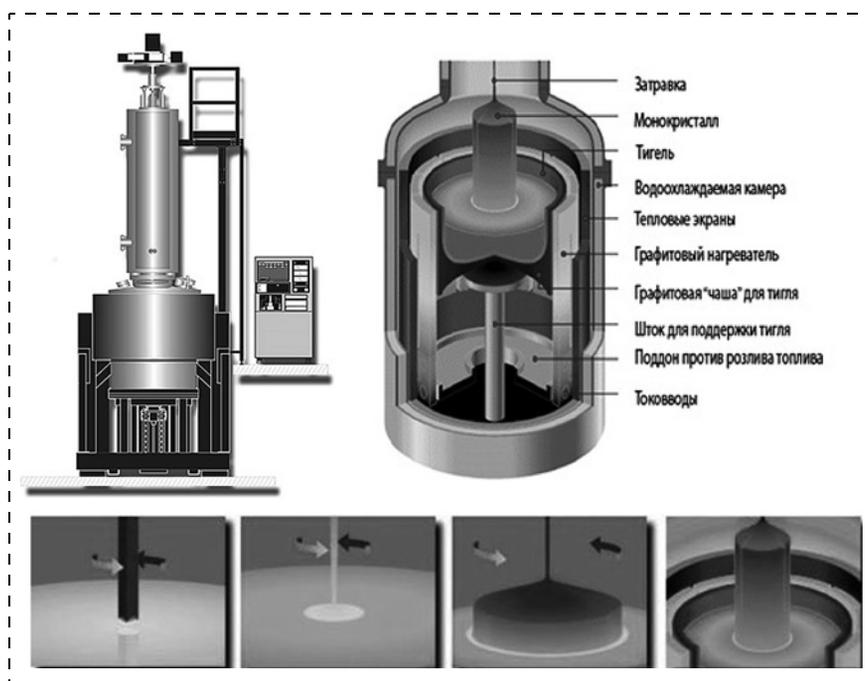


Рис. 1. Принципиальная схема метода Чохральского

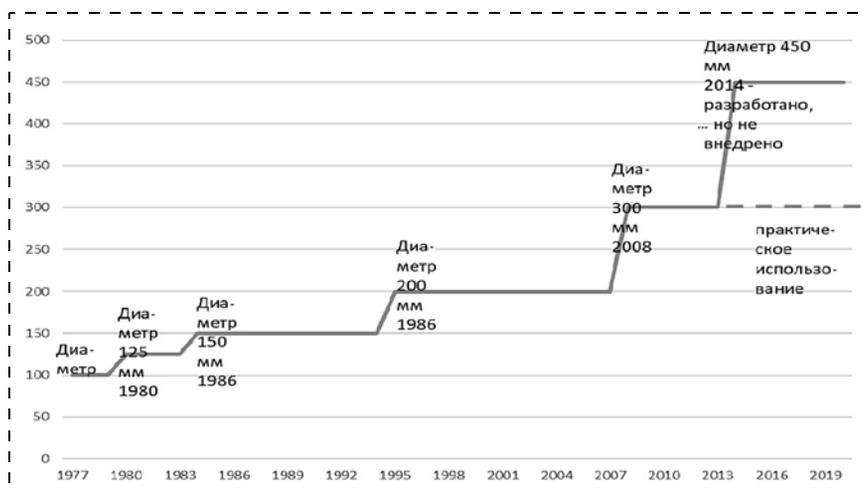


Рис. 2. История роста диаметров промышленно выпускаемых монокристаллов Si [6]

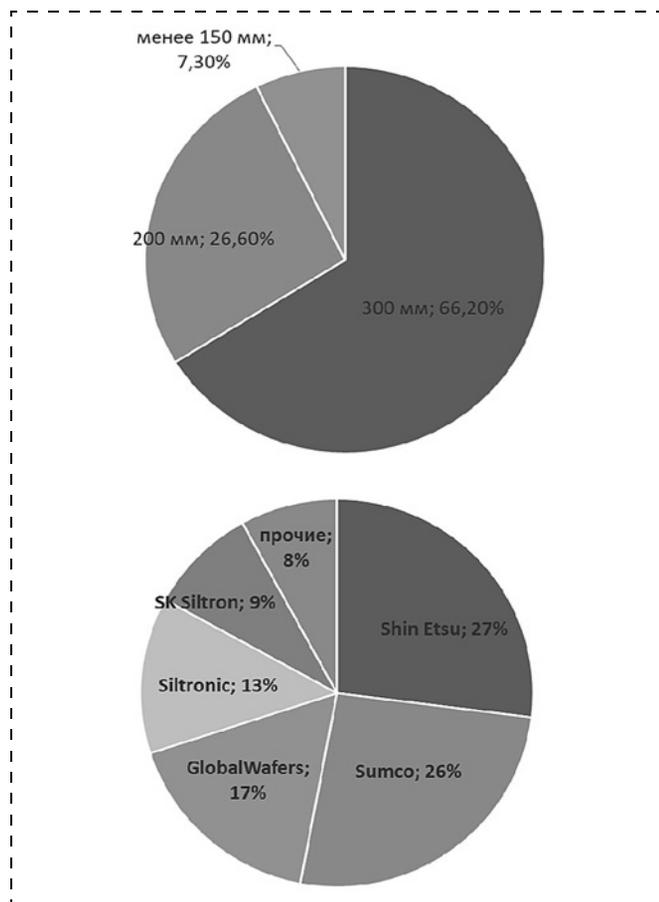


Рис. 3. Диаметры кремниевых пластин и основные компании-производители

conductor, Ltd., Tokuyama Corporation, NexWafe GmbH, PV Crystalox plc, Okmetic (рис. 3).

Еще в 2012 г. ведущие производители микросхем объявили о начале совместной работы по переводу своих производств на кремниевые подложки 450 мм. Переход, как ожидалось, поможет удовлетворять спрос на микросхемы, а также снизить производственные издержки в расчете на микросхему. Аналитики тогда посчитали, что новые подложки будут использованы вместо применяемых сейчас подложек размером 300 мм, что в конечном итоге даст экономию около 30 %. Компании Intel, Samsung, GlobalFoundries, TSMC, IBM создали консорциум Global 450 Consortium (G450C) в содружестве с The Colleges of Nanoscale Science and Engineering (CNSE) при SUNY Polytechnic Institute (SUNY Poly). Консорциум предполагал вложить 4,8 млрд долл. в создание инфраструктуры для производства 450-миллиметровых пластин. Вскоре корпорация Intel

продемонстрировала первые в мире полностью обработанные 450-миллиметровые подложки. Сейчас очевидно, что ожидания были завышены. В 2013 г. компания ASML — мировой лидер в области производства фотолитографического оборудования приостановила инвестиции в 450-миллиметровые инструменты производства. Сегодня идея 450-миллиметровых пластин выглядит мертвой. Пилотные программы закончились, фирмы по-прежнему сосредоточены на наращивании 300-миллиметровых пластин, и ни одна не выступает за исследования или развертывание 450-миллиметровых пластин. Высокие затраты опровергли любые аргументы в пользу более высокой экономии затрат в долгосрочной перспективе. По-видимому, это произошло вследствие впечатляющих успехов в переходе на 3, 5, 7 нм нормы проектирования при разработке интегральных схем. Видимо, это еще не предел. Габаритные размеры транзистора во многом зависят от размеров затвора. Команда специалистов из Китая в 2022 г., используя графен, установила новый рекорд — 0,34 нм [5]. Возможно он станет последним технологическим достижением в рамках закона Мура. Экономическим успехам в использовании 300-миллиметровых пластин также способствует прогресс методов 3D-интеграции интегральных схем. По состоянию на середину 2022 г. все новые и планируемые производственные комплексы продолжают использовать кремниевые подложки 300-миллиметровых, а 450-миллиметровые пластины останутся экзотикой еще достаточно долго (рис. 4). Однако возможно, что наблюдающийся дефицит полупроводниковой продукции и рекордная выручка производителей подстегнут возобновление разработок в этом направлении [6].

В нашу задачу не входит анализ всех технико-экономических проблем перехода отрасли на подложки большего диаметра. На сегодня это больше экономическая проблема целесообразности разра-

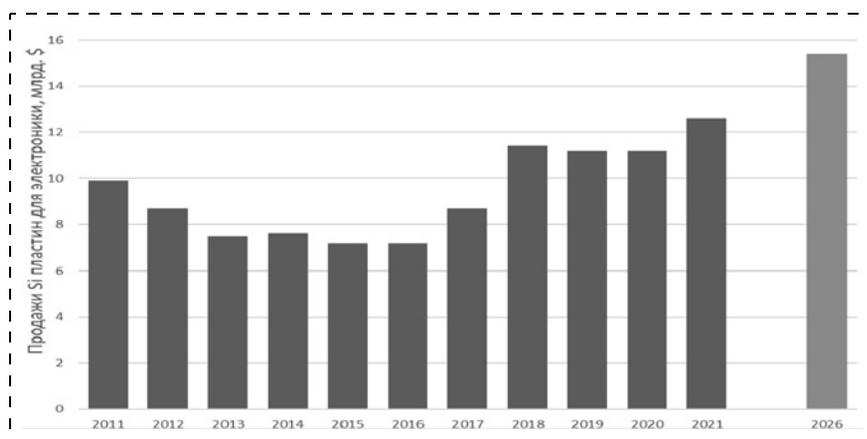


Рис. 4. Динамика рынка подложек для электроники 2011–2021 гг. и прогноз, млрд долл. (источник — SEMI, MarketInsightsReports)

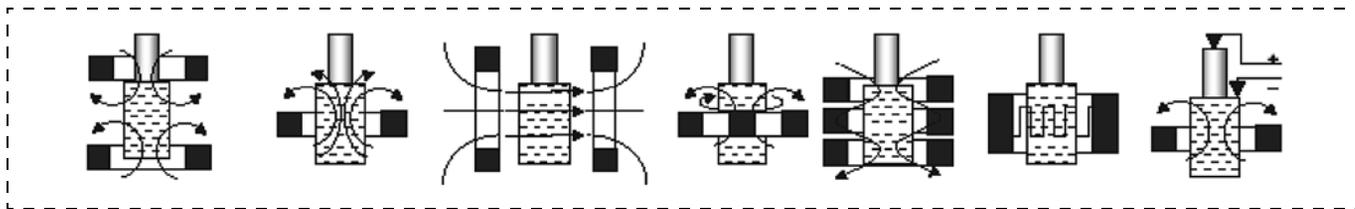


Рис. 5. Схематическое изображение метода Чохральского с различными вариантами наложения на расплав магнитного поля (MCZ)

ботки и внедрения новой экосистемы технологического оборудования для обработки таких слитков и пластин. Представляется, что когда-то этот переход произойдет, для каких-то типов микросхем — раньше, для других — позже. Для целей оценки перспектив развития собственно метода Чохральского важно отметить, что уже сегодня при выращивании кристаллов диаметром 400–450 мм преодолена, как когда-то для диаметра 300 мм, большая часть фундаментальных материаловедческих проблем, связанных с поведением в слитке собственных точечных дефектов, кислорода, образования вакансий, и проч. Разработчики технологии промышленного выращивания методом Чохральского слитков диаметром 450 мм столкнутся преимущественно со следующими технико-экономическими проблемами:

- повышенный риск нарушения кристаллической структуры вследствие ускоренной коррозии тигля и повышения флуктуаций температуры в расплаве;
- большие потери материала при срыве бездислокационного роста и скольжения дислокаций в бездислокационную область на расстояние, приблизительно равное диаметру кристалла;
- выращиваемый кристалл должен быть длиннее, чтобы достичь той же доли годного материала (цилиндрическая часть) по отношению к конусам и тигельному остатку;
- увеличение ростового цикла за счет уменьшения скорости вытягивания, необходимого для минимизации термонапряжений и отвода теплоты кристаллизации, а также возрастание времени плавления загрузки и времени охлаждения кристалла.

Пример требований к современным установкам выращивания Si приведен в табл. 1. Представляется, что для выращивания кремния электронного качества с ростом диаметра кристалла (помимо роста размеров установки, загрузки и теплового узла) будет еще более актуальной задача снижения дефектообразования в бездислокационных монокристаллах при их посткристаллизационном охлаждении. Одним из ключевых решений является повышение стерильности процесса выращивания и снижение содержания кислорода в выращенном кристалле, для чего в большинстве случаев используется наложение магнитного поля на расплав (рис. 5). Управление потоками расплава позволяет управлять содержанием кислорода в области кристаллизации [7].

#### Солнечная энергетика

Для понимания, какие кремниевые пластины нужны солнечной энергетике сегодня, рассмотрим основные типы архитектуры современных солнечных элементов (СЭ):

- традиционная структура Al-BSF;
- PERC — Passivated Emitter Rear Cell;
- HJT — Heterojunction cells — гетероструктурные элементы;
- IBC — Interdigitated Back Contact cells — структуры с интегрированным тыльным контактом, токоъем осуществляется контактными "столбиками", соединяющими лицевую и тыльную части солнечного элемента;
- TOPCon — Tunnel Oxide Passivated Contact — структура, пассивированная слоем оксида, обеспечивающем туннелирование электронов.

Таблица 1

Технические данные современных установок выращивания монокристаллов электронного кремния

Наименование	Диаметр тигля, мм	Масса загрузки, кг	Размеры кристалла, диаметр/длина мм	Примечание
CGS 1218	до 900	450	до 450/2800	Производитель (PVA Crystal Growing Systems GmbH) — приведено в качестве примера: оборудование для выращивания кристаллов всегда сильно "кастомизировано" и является частью ноу-хау технологического процесса

Традиционная Al-BSF: солнечный элемент создан на основе кремневой пластины *p*-типа. Фронтальная поверхность пассивируется диэлектриками, такими как SiN<sub>x</sub>, которые также действуют как антиотражающий слой. Тыльная поверхность кремневой пластины не пассивируется. Алюминий (Al) легируется в Si для образования "площадки тыльной поверхности" (*back surface field-BSF*) во время процесса обжига, чтобы предотвращать рекомбинацию неосновных носителей на тыльной поверхности.

PERC — *Passivated rear emitter contact solar cell* — пассивированная солнечная батарея с "тыльным излучателем". В них, как переднюю, так и заднюю поверхности устройства пассивируют диэлектриками. Небольшие отверстия тыльного слоя диэлектрика вытравливают с помощью лазера, чтобы металл мог контактировать с задней поверхностью устройства. По сравнению с обычными кремневыми солнечными батареями PERC способен повысить эффективность кремневых солнечных элементов за счет дополнительного пассивирующего диэлектрического слоя на тыльной стороне.

PERT — аббревиатура от *passivated emitter rear totally diffused* — "пассивированный излучатель, который сзади полностью рассеян". В последнее время он привлек широкое внимание. Поскольку структура PERC достигает практического предела эффективности преобразования, исследователи ищут другие архитектуры элементов, чтобы продолжать повышать эффективность.

TOPCon — аббревиатура от "*tunnel oxide passivated contact*", также известный как "пассивирован-

ный контакт", рассматривается как следующее поколение технологии солнечных элементов после PERC. В настоящее время это одна из наиболее передовых технологий для солнечного элемента *N*-типа. Технология позволяет уменьшить рекомбинационные потери в переходе, что ведет к повышению эффективности. Впервые концепция TOPCon была предложена институтом Fraunhofer ISE в 2014 г., но до 2019 г. она не получила значимого распространения. После того, как ее начали использовать такие крупные производители, как Trina Solar, JA Solar и Longi Solar, были получены в серийном производстве солнечные панели с КПД выше 22 %.

НІТ (НІТ) — аббревиатура от *hetero-junction solar cells* — "солнечные элементы с гетеропереходом". Представленный японской компанией Sanyo в 1980-х годах, а затем приобретенный Panasonic в 2010-х, НІТ считается еще одним потенциальным преемником популярной солнечной батареи PERC, помимо прочих технологий, таких как PERT и TOPCon. Гетероструктурные НІТ солнечные элементы в основе имеют обычные кристаллические элементы, покрытые дополнительными тонкопленочными слоями аморфного кремния на каждой стороне. Эти пленки формируют гетеропереходы в дополнение к основному переходу. Разные типы переходов преобразуют разные участки спектра солнечного света в электричество. За счет этого эффекта достигается повышение общего КПД преобразования солнечной энергии в гетероструктурном солнечном элементе. В России НІТ производит компания "Хэвел".

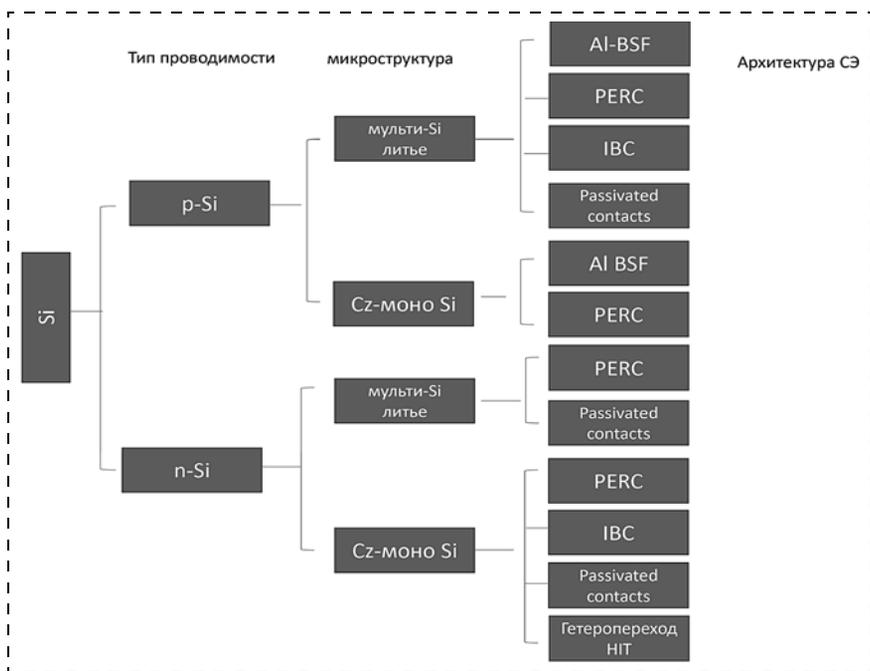


Рис. 6. Схема использования различных типов кремневых пластин для разных типов СЭ

В солнечных элементах ИВС (*Interdigitated Back Contact*) — создается сетка из проводников-"столбиков", которые соединяются с задней частью солнечного элемента. В отличие от обычных солнечных элементов, в элементах ИВС передняя поверхность солнечного элемента полностью свободна. За счет этого достигается улучшение КПД солнечного элемента [8, 9].

На рис. 6 приведена схема использования различных типов кремневых пластин для разных типов СЭ.

Общие закономерности развития метода Чохральского для всех типов СЭ:

1. Увеличение диаметра кристалла. Для бурно развивающейся солнечной энергетики требование роста диаметра выращиваемого кристалла долгое время не являлось столь экономически кри-

Таблица 2

Зависимость цены *p*-типной пластины толщиной 160 мкм от размера на начало 2022 г.

Размер пластины, мм	218,2	210	182	166	158,75
Цена, юань/шт.	9,36	8,65	6,53	5,40	5,50

тичным, как для микроэлектроники. Большинство выращиваемых до 2021 г. монокристаллов имели диаметр 200 мм, из которых вырезают квадратные элементы  $156 \times 156$  мм. Из таких элементов собирают солнечные батареи любой площади. Однако в 2021–2022 гг. по тем же экономическим причинам наметился сдвиг в сторону использования больших диаметров и в солнечной энергетике (рис. 7, см. вторую сторону обложки).

В 2022 г. китайский производитель ZSC представил первые кремниевые пластины формата  $218,2 \times 218,2$  мм [6] (табл. 2).

2. *Повышение производительности процесса Чохральского.* Критически важным всегда является требование удешевления производства, так как метод Чохральского изначально является более дорогим, чем, например, метод получения "мульти-кремния" с загрузкой 400...800 кг поликремния. Поэтому, как представляется, метод будет эволюционировать в сторону повышения производительности, для этого актуализируются ранее известные модификации метода Чохральского. Для увеличения производительности, расходуемый при кристаллизации объем расплава может пополняться за счет подпитки постепенным подплавлением в периферической области тигля поликристаллического стержня или дозагрузки гранул поликремния. Также практикуются и промежуточные дозагрузки — выращенные монокристаллы выводят через специальные шлюзовые устройства, а в тигель добавляют очередную порцию шихты для выращивания следующего кристалла. Этот подход получил название полунепрерывного метода выращивания — continuous CZ (CCZ). Из одного кварцевого тигля последовательно выращивают несколько монокристаллов (рис. 8, а). При этом нагреватель не выключают, а вы-

ращенные кристаллы извлекают через шлюзовую систему. После каждого процесса тигель пополняют новой порцией материала. Разновидностью метода является использование двойного тигля, когда дозагрузку осуществляют во внешний тигель (рис. 8, б). Дозагрузку выполняют гранулированным Si, либо кусками Si.

Поэтому сегодня по прогнозам развития метода Чохральского отдалено предпочтение опережающему развитию метода CCZ (рис. 9) [6], см. вторую сторону обложки).

Любопытным является также подход, продемонстрированный в работе [10]. Повышения общей производительности процесса также можно добиться за счет повышения скорости вытягивания кристалла Si из расплава. Для того чтобы обойти естественные пределы, связанные с инерционностью процесса остывания выращенного кристалла, предлагается охлаждать выращенный кристалл

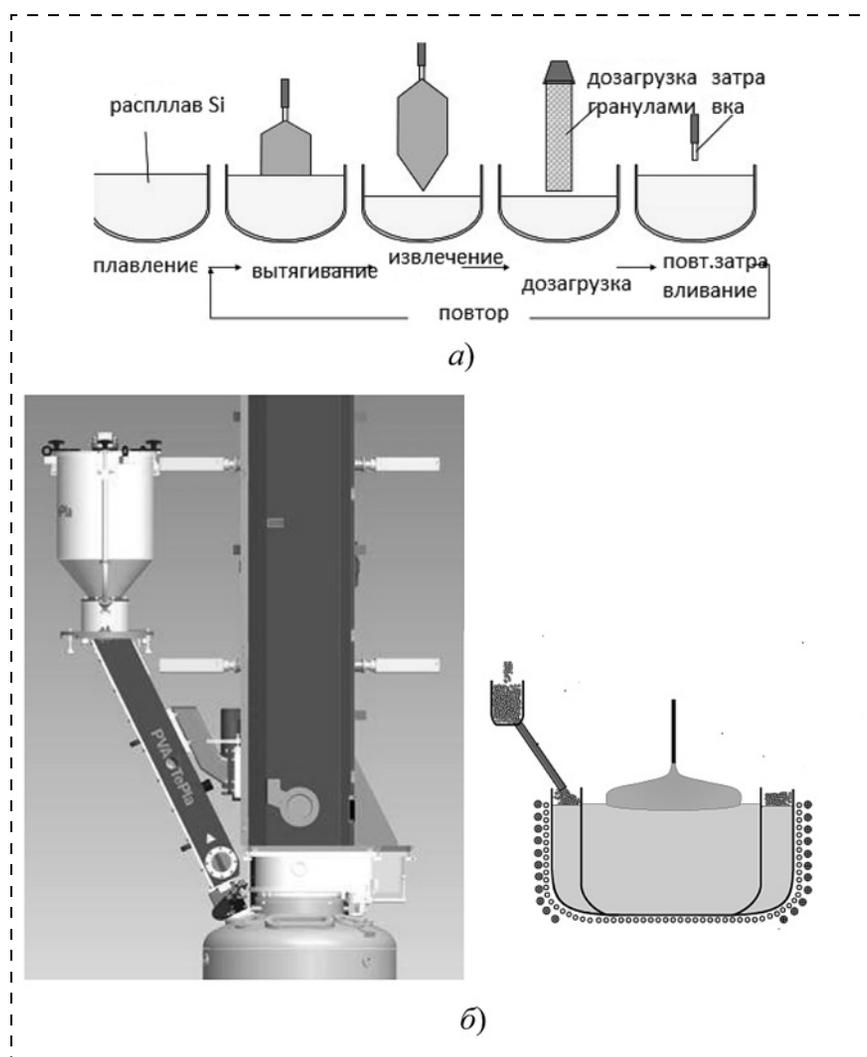


Рис. 8. Схематическое изображение разновидностей метода CCZ:

а — многократное вытягивание из одного тигля; б — дозагрузка в двойной тигель во время процесса и пример дозагрузочного устройства (PVA Crystal Growing Systems GmbH)

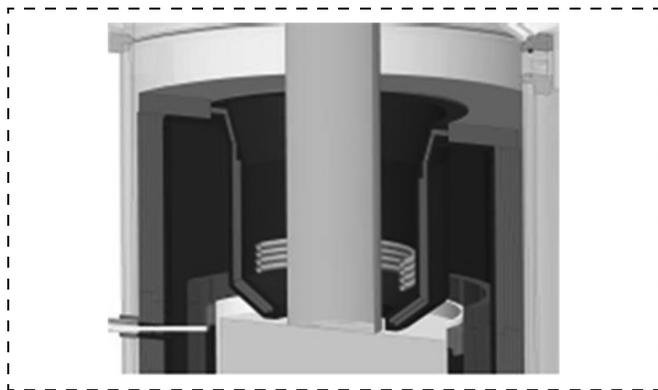


Рис. 10. Пример ускоренного охлаждения выращенного кристалла [10]

в посткристаллизационной зоне с помощью водоохлаждаемого индуктора, расположенного выше зоны кристаллизации (рис. 10).

#### Специфические проблемы метода Чохральского для современных СЭ

Существует также еще один важный фактор развития, наметившийся в последние годы. До 2021—2022 гг. среди солнечного моно-Si абсолютно доминировал кремний *p*-типа, легированный бором (рис. 11, см. вторую сторону обложки). Сегодня развитие, по оценкам большинства экспертов, идет в сторону использования Si *n*-типа, легированного фосфором (рис. 12). Это позволяет получить солнечные элементы с высоким КПД, а также избавиться от светоиндуцированной деградации СЭ, вызванной комплексами бор—кислород (В—О) [9, 10].

Соотношение между содержанием примеси в твердой и жидкой фазах в условиях кристаллизации, отличных от равновесных, характеризуют эффективным коэффициентом ее распределения [1, 2]. Вследствие того, что коэффициенты распределения примесей бора (равновесный коэффициент распределения  $k_0 = 0,8$ ) и фосфора ( $k_0 = 0,35$ ) меньше единицы, в процессе кристаллизации происходит постепенное их накопление в расплаве по причине отталкивания их атомов от фронта кристаллизации в расплав. В результате происходит увеличение концентрации примесей бора и фосфора как в расплаве, так и в растущем из него монокристалле в течение процесса кристаллизации. Однако эффективный коэффициент распределения фосфора значительно меньше коэффициента распределения бора в Si, поэтому в случае фосфора, накопление примесей в кристалле и расплаве идет значительно быстрее. Вследствие чего доля кристалла с требуемыми электрофизическими параметрами (так называемый "выход в годную продукцию") существенно меньше, чем в случае с бором (рис. 13).

Это означает, что востребованным может оказаться метод ССЗ в разновидности рис. 8, б, поскольку выращивание кристалла из двойного тигля (или "плавающего тигля") с подпиткой расплава является признанным и отработанным более полувека способом увеличения равномерности распределения примеси по длине слитка [1—3]. При этом в основной тигель с расплавом помещается контейнер меньшего размера, из которого и производится выращивание кристалла. Малый объем расплава сообщается с основным объемом расплава, обеспечивая дополнительные порции расплава с заданной концентрацией легирующих примесей.

#### Тенденции и перспективы развития метода Чохральского в России

После катастрофического обрушения отечественной микроэлектроники в середине-конце 90-х гг. предприятия Минцветмета (которым исторически принадлежали основные производители монокристаллов кремния и германия), МЭП и оборонной промышленности были лишены государственной и финансовой поддержки для ведения конкурентной борьбы с зарубежной электроникой. Тем не менее, некоторые базовые предприятия по производству монокристаллов и пластин кремния смогли выжить, что не в последнюю очередь свя-

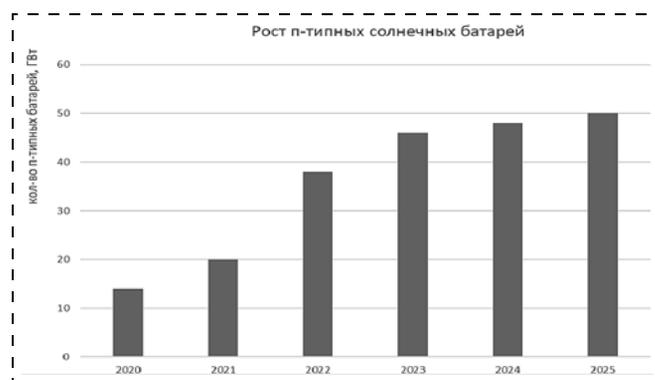


Рис. 12. Рост СЭ *n*-типа 2020—2025 гг., ГВт (источник — Energy Trend)

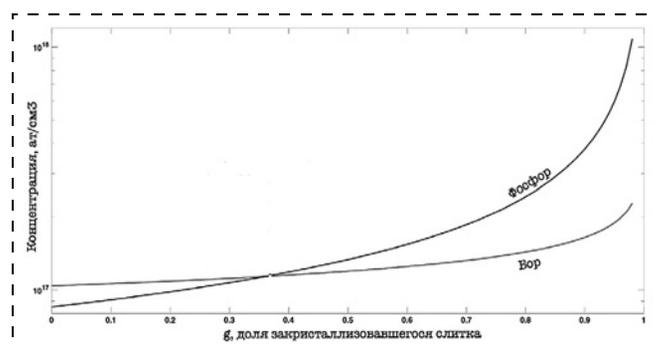


Рис. 13. Распределение примеси по длине кристалла при легировании бором и фосфором

Технические данные промышленных установок выращивания монокристаллов солнечного кремния

Наименование	Диаметр тигля, мм	Масса загрузки (без дозагрузки), кг	Число процессов из одного тигля	Размеры кристалла, диаметр/длина, мм	Примечание
"Редмет-90М" Гиредмет (Москва)	508	120	1—2	250/2000	Последняя отечественная разработка Поколение N
—	610	120 + дозагрузка	3	250/3000	США, Германия, КНР, Поколение N + 1
—	850	320 + дозагрузка	5	300/5000	США, Германия, КНР, Поколение N + 2

зано с научной и инженерной школой, заложенной в 1960-е гг. В этот период стало возможным даже конструирование и производство нового поколения ростового оборудования по методу Чохральского. За период начала 2000-х гг. рядом предприятий отрасли были спроектированы и изготовлены малыми сериями целый ряд установок. Все они созданы в той или иной мере на базе технических решений установки "Редмет-90". С середины 2000-х гг. таких попыток не делается.

В настоящее время производством электронного кремния диаметром до 200 мм занимаются два небольших предприятия в Москве и Зеленограде на оборудовании, разработанном в России в начале 2000-х гг. Российскими производителями были выращены отдельные кристаллы моно-Si диаметром 300 мм. Производство солнечного кремния методом Чохральского осуществляется в Подольске на установках новых поколений с увеличенной загрузкой, производства КНР или Тайваня (табл. 3).

### Заключение

Мировые рынки полупроводникового кремния для нано- и микроэлектроники, а также для солнечной энергетики входят в новую фазу развития. Общая политико-экономическая ситуация в мире, провозглашенный всеми правительствами "зеленый поворот" в энергетике, развитие локальных рынков и восстановление цен до инвестиционного оптимума способствовали новому импульсу развития.

Российская нано- и микроэлектроника крайне нуждается в собственной сырьевой базе. Отечественная солнечная энергетика наконец приблизилась к порогу, который делает рентабельным реализацию всей технологической цепочки производства фотовольтаической продукции. В России принято решение о дальнейшем развитии солнечной энергетики и строительстве 1 ГВт фабрики в Калининградской области по производству солнечных элементов (компания ЭнКОР). Это потребует кремниевых пластин в объемах, которые делают проблематичным устойчивое снабжение производства по контрактам с зарубежными производи-

телями, причем следует помнить, что речь идет о высококачественных пластинах *n*-типа. Кроме того, компания Солар Системз также имеет производство монокремния в Подольске и заявляет об увеличении производственных мощностей. Это означает, что потребность в исходном поликремнии только для целей производства монокристаллов составит около 7 тыс. т/год, что очень близко к рекомендуемой специалистами мощности производства поликремния (10 тыс. тонн), обеспечивающей конкурентную себестоимость этого продукта. При этом и производство поликремния, и производство монокристаллов и пластин должны быть локализованы в России. Это означает, что в настоящее время в России впервые сформировались условия для осуществления экономически обоснованного важнейшего проекта — воссоздания полупроводниковой кремниевой индустрии. Это позволит дать импульс по смежным направлениям (производство комплектующих и расходных материалов и многое другое). Кроме того, обоснованным будет и производство оборудования для этих задач, поставки которого либо затруднены, в связи с последствиями эпидемии, либо проблематичны вследствие санкционных ограничений.

### Список литературы

1. **2022 to Mark** the Third Year in a Row of  $\geq 20$  % Growth for the Foundry Market. URL: <http://www.icinsights.com/news/bulletins/2022-To-Mark-The-Third-Year-In-A-Row-Of-20-Growth-For-The-Foundry-Market/>
2. **Фалькевич Э. С., Пульнер Э. О., Червоний И. Ф., Шварцман Л. Я.** Технология полупроводникового кремния. М.: Металлургия, 1992. 408 с.
3. **Шашков Ю. М.** Выращивание монокристаллов методом вытягивания. М.: Металлургия, 1982. 214 с.
4. **Uecker R.** The historical development of the Czochralski method // *Journal of Crystal Growth*, 2014. Vol. 401. P. 7—25.
5. <https://hightech.plus/2022/03/14/sozdan-grafenovii-zatvor-dlya-tranzistora-razmerom-s-atom-ugleroda>
6. **Наумов А. В., Орехов Д. Л., Кульчицкий Н. А.** Прогресс в технологиях полупроводникового кремния (обзор) // *Успехи прикладной физики*. 2022. Том 10, № 1. С. 32—49. DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-32-50
7. **Zulehner W.** Historical Overview of Silicon Crystal Pulling development. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510799004274> (дата обращения 18.02.2022)

8. Battaglia C., Cuevasb A., De Wolfc S. High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives // *Energy Environ. Sci.* 2016. N. 9. P. 1552–1576. DOI: 10.1039/c5ee03380b

9. Интрига солнечной энергетики: ячейки n-типа или p-типа? — RenEn <https://renew.ru/solar-energy-intrigue-n-type-or-p-type-cells/> (дата обращения 18.02.2022)

10. Mosel F., Denisov A. V., Klipp B., Kunert R., Dold P. Cost effective growth of silicon mono ingots by the application of increased pull speed in Cz-puller // [https://www.pvatepla-cgs.com/fileadmin/user\\_upload/CGS/Mediathek/pva-cgs-crystal-growing-systems-cost-effective\\_growth\\_Si\\_ingots\\_increased-pullspeed-poster.pdf](https://www.pvatepla-cgs.com/fileadmin/user_upload/CGS/Mediathek/pva-cgs-crystal-growing-systems-cost-effective_growth_Si_ingots_increased-pullspeed-poster.pdf)

A. V. Naumov<sup>1</sup>, Head of Department, D. L. Orekhov<sup>2</sup>, Ph. D., General Director, N. A. Kulchitsky<sup>3,4</sup>, D. Sci., Prof.

<sup>1</sup> Experimental Design Bureau "ASTROHN", JSC, Lytkarino, Moscow Region, Russian Federation

<sup>2</sup> Research and Development Center for Thin-Film Technologies in Energetics, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup> State Scientific Center of the Russian Federation, NPO ORION JSC, Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup> Moscow Technological University (Moscow Institute of Radio, Electronics and Automatics, MIREA), Moscow, Russian Federation

Corresponding author:

Naumov Arkady V., Head of Department, JSC Astrohn, Lytkarino, Moscow region, 140080, Russian Federation, e-mail: [naumov\\_arkadii@mail.ru](mailto:naumov_arkadii@mail.ru)

## The Recent Progress in Cz-Method for Silicon in Nano- and Micro-Electronics

Received on March 18, 2022

Accepted on April 04, 2022

*The current state and prospects of development of the world and Russian markets of semiconductor monocrystalline solar and electronic silicon obtained by the Czochralski method (Cz-Si) are considered. The growing demand for microelectronics, the "green turn" proclaimed by all governments in the energy sector and the restoration of prices to an investment-attractive level, contributed to the emergence of new projects. The development of domestic silicon microelectronics in the light of well-known events is becoming an urgent necessity. Domestic solar energy has also approached the threshold that makes it cost-effective to implement the entire technological chain of production.*

**Keywords:** nano- and microelectronics, solar energy, Czochralski method, supply, demand, balance

For citation:

Naumov A. V., Orekhov D. L., Kulchitsky N. A. The Recent Progress in Cz-Method for Silicon in Nano- and Micro-Electronics, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 178–186.

DOI: 10.17587/nmst.24.178-186

### References

1. 2022 to Mark the Third Year in a Row of  $\geq 20$  % Growth for the Foundry Market. <https://www.icinsights.com/news/bulletins>

2. Fal'kevich E. S., Pul'ner E. O., Chervonyj I. F., Shvarcman L. Ya. *Tekhnologiya poluprovodnikovogo kremniya*, Moscow, Metallurgiya, 1992, 408 p.

3. Shashkov Yu. M. *Vyrashchivanie monokristallov metodom vytyagivaniya*, Moscow, Metallurgiya, 1982, 214 p.

4. Uecker R. "The historical development of the Czochralski method", *Journal of Crystal Growth*, 2014, vol. 401, pp. 7–25.

5. <https://hightech.plus/2022/03/14/sozdan-grafenovii-zatvor-dlya-tranzistora-razmerom-s-atom-ugleroda>

6. Naumov A. V., Orekhov D. L., Kul'chickij N. A. Progress v tekhnologiyah poluprovodnikovogo kremniya (obzor), *Uspekhi*

*prikladnoj fiziki*, 2022, vol. 10, no. 1, pp. 32–49, DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-32-50

7. Zulehner W. Historical Overview of Silicon Crystal Pulling development // <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510799004274> (date of application 18.02.2022)

8. Battaglia C., Cuevasb A., De Wolfc S. High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives, *Energy Environ. Sci.*, 2016, no. 9, pp. 1552–1576. DOI: 10.1039/c5ee03380b

9. Intriga solnechnoj energetiki: yachejki n-ti pa ili p-ti pa? — RenEn <https://renew.ru/solar-energy-intrigue-n-type-or-p-type-cells/> (date of application 18.02.2022).

10. Mosel F., Denisov A. V., Klipp B., Kunert R., Dold P. Cost effective growth of silicon mono ingots by the application of increased pull speed in Cz-puller, [https://www.pvatepla-cgs.com/fileadmin/user\\_upload/CGS/Mediathek/pva-cgs-crystal-growing-systems-cost-effective\\_growth\\_Si\\_ingots\\_increased-pullspeed-poster.pdf](https://www.pvatepla-cgs.com/fileadmin/user_upload/CGS/Mediathek/pva-cgs-crystal-growing-systems-cost-effective_growth_Si_ingots_increased-pullspeed-poster.pdf)

Д. В. Савельев, аспирант, инженер, e-mail: dimsav94@gmail.com,  
В. И. Мусатов, магистрант, стажер-исследователь, e-mail: musatov.v.i@mail.ru  
МИРЭА — Российский Технологический Университет (РТУ МИРЭА), Москва

## НОВЫЙ ТИП МАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ СОЗДАНИЯ АНИЗОТРОПНОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Поступила в редакцию 03.02.2022 г.

*Изготовлены магнитострикционные волоконные композиты (МВК) на основе проволок никеля диаметром 150 мкм, погруженные в полимерную матрицу. Исследованы полевые и угловые зависимости магнитострикции МВК. Получены частотные, полевые и угловые зависимости магнитоэлектрического напряжения в структуре ЦТС-МВК. Наибольший по значению магнитоэлектрический коэффициент  $\alpha_1 = 1,17 \text{ В}/(\text{Э} \cdot \text{см})$  получен на частоте 7,86 кГц при параллельной ориентации магнитного поля относительно проволок. Анизотропия МЭ эффекта обусловлена анизотропией магнитострикции МВК.*

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, магнитострикция, анизотропия, композитная структура, цирконат-титанат свинца, никель, волоконный композит, резонанс, размагничивающий фактор, магнитное поле

### Введение

Прямой магнитоэлектрический (МЭ) эффект заключается в возникновении поляризации образца во внешнем магнитном поле [1]. Этот эффект представляет интерес для использования в новых типах датчиков магнитных полей, устройств обработки информации, автономных источников энергии, управляемых устройств электроники и др. [2—4]. В слоистых композитных структурах МЭ эффект возникает в результате комбинации магнитострикции ферромагнитного (ФМ) слоя и пьезоэффекта в пьезоэлектрическом (ПЭ) слое благодаря механической связи между слоями. Для описания эффективности МЭ эффекта был введен соответствующий коэффициент  $\alpha_E = e/h = u/(b \times h)$ , где  $b$  — толщина пьезоэлектрика,  $u$  — электрическое напряжение, генерируемое между электродами ПЭ слоя, возникающее под действием переменного магнитного поля  $h$ .

Было проведено большое число исследований в структурах с различными магнитными и пьезоэлектрическими материалами. В качестве магнитных материалов чаще всего использовали металлы Ni, Co, сплавы FeNi, FeCo, FeGa, терфенол-Д, ферриты ( $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$ ) и аморфные магнитные сплавы на основе железа [5, 6]. В качестве пьезоэлектрических материалов в основном используют различные керамики (ЦТС, PMN-PT) [6], монокристаллы (кварц, лангитат) [7] и пьезополимеры [8]. Однако, несмотря на достигнутые успехи, поиск новых магнитных и пьезоэлектрических материалов, которые могут быть использованы для созда-

ния МЭ слоистых композитных структур до сих пор является актуальной задачей.

В частности, один из самых высоких коэффициентов ранее наблюдался в структурах, изготовленных на основе пьезоволоконного композита (ПВК) производства компании *Smart Material Corporation (Sarasota, FL, USA)* [9, 10]. ПВК представляет собой набор стержней, изготовленных из пьезоэлектрической керамики, расположенных параллельно друг другу в плоскости и помещенных в полимерную матрицу. Преимуществами такого типа материалов являются высокий пьезомодуль, гибкость и относительно невысокая цена. Кроме того, такие материалы подходят для создания сильной анизотропии МЭ эффекта, что важно для создания магнитных датчиков, чувствительных к ориентации магнитного поля.

По аналогии с ПВК недавно было предложено использовать магнитострикционные волоконные композиты (МВК) в качестве магнитных слоев МЭ структур. МВК состоит из набора магнитострикционных проволок, расположенных в плоскости параллельно друг к другу и помещенных в полимерную матрицу [11]. Данный материал является высоко чувствительным к направлению магнитного поля, что позволило получить сильно анизотропный МЭ эффект.

В данной работе детально исследованы угловые характеристики МВК, изготовленных на основе проволок никеля. В структуре ЦТС-МВК измерены полевые и угловые зависимости магнитострикции МВК, а также частотные, полевые и угловые зависимости МЭ эффекта. Приведен расчет угловых зависимостей МЭ напряжения.

## Образцы и методика измерений

Фотография исследуемой двухслойной структуры приведена на рис. 1. Структура состояла из пьезокерамического диска, к которому с одной стороны с помощью цианакрилатного клея был присоединен магнитострикционный волоконный композит. МВК был изготовлен из проволок никеля диаметром 150 мкм, уложенных вплотную друг к другу в один слой и погруженных в полимерную матрицу на основе клея БФ-2. Размеры МВК в плоскости составили  $9,7 \times 9,4$  мм. Его толщину считали равной диаметру проволок никеля. В качестве ПЭ слоя использовали коммерчески доступный диск ЦТС-19 состава  $PbZr_{0,52}Ti_{0,48}O_3$  диаметром 16 мм и толщиной 200 мкм. На поверхностях диска были нанесены серебряные электроды. Сам диск был поляризован в поперечном направлении. Такие структуры относятся к типу "1-2", согласно современной классификации [12].

Структуру помещали между полюсами электромагнита, создававшего постоянное магнитное поле значением до 1 кЭ, с помощью специального подвеса, позволявшего осуществлять поворот образца вокруг своей оси на  $360^\circ$ . Переменное магнитное поле  $h \cos(2\pi ft)$  амплитудой  $h = 0 \dots 0,8$  Э создавали с помощью катушек Гельмгольца. Магнитные поля были параллельны и направлены в плоскости образца. Генерируемое структурой МЭ напряжение измеряли с помощью вольтметра АК ИП 2401 со входным сопротивлением 1 МОм. Полевые и угловые зависимости магнитострикции МВК измеряли с помощью установки, описанной в работе [13].

## Экспериментальные результаты

На рис. 2 приведена измеренная зависимость магнитострикции МВК от магнитного поля  $H$ , направленного вдоль оси проволок. Видно, что значение магнитострикции насыщения достигает  $\sim 35 \cdot 10^{-6}$ , что сопоставимо с магнитострикцией никеля. Поле насыщения составляет  $H_s \approx 380$  Э.

На рис. 3 приведены результаты измерения частотных зависимостей магнитоэлектрического напряжения  $u(f)$ , генерируемого структурой для двух ориентаций магнитного поля: поле направлено в

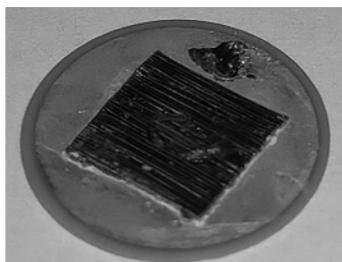


Рис. 1. Фотография исследуемого образца

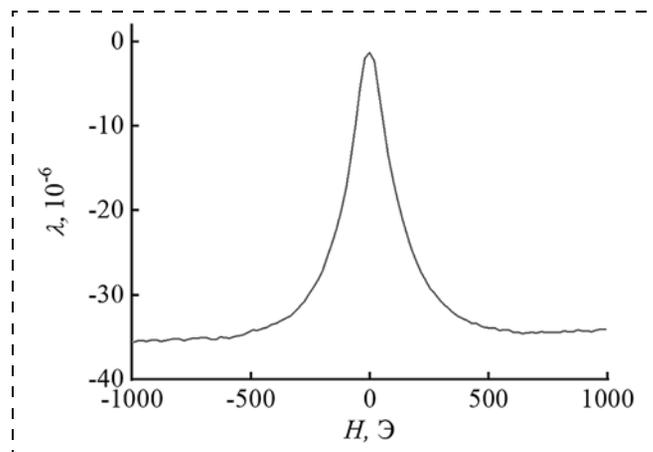


Рис. 2. Зависимость магнитострикции МВК от магнитного поля

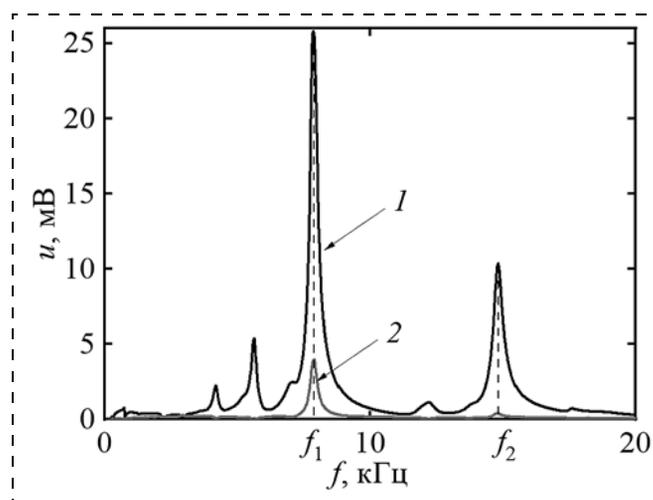


Рис. 3. Участок амплитудно-частотной зависимости МЭ напряжения при намагничивании структуры магнитным полем параллельно (кривая 1) и перпендикулярно (кривая 2) оси проволок

плоскости структуры вдоль и поперек осей проволок никеля. На рис. 3 наблюдаются два резонансных пика на частотах  $f_1 = 7,86$  кГц и  $f_2 = 14,81$  кГц, соответствующих разным модам изгибных колебаний. Значения МЭ напряжения для частот  $f_1$  и  $f_2$  при намагничивании вдоль оси проволок составили  $u_1 = 25,81$  мВ и  $u_2 = 10,35$  мВ, соответственно. Вследствие индуктивности катушек амплитуда переменного возбуждающего магнитного поля уменьшалась с ростом частоты от  $f_1$  до  $f_2$  с  $h_1 = 0,75$  Э до  $h_2 = 0,38$  Э. Соответствующие МЭ коэффициенты составили  $\dot{a}_1 = 1,7$  В/(Э · см) и  $\dot{a}_2 = 1,36$  В/(Э · см). Добротности резонансов  $Q_1 \approx 33$  и  $Q_2 \approx 49$ . Значение МЭ коэффициента сопоставимо с полученными ранее результатами для структур, изготовленных на основе слоев никеля [14]. При намагничивании структуры перпендикулярно оси проволок, значения МЭ напряжения на резонансных частотах

тах были равны  $u_1 = 3,96$  мВ и  $u_2 = 0,38$  мВ. Соответствующие значения МЭ коэффициентов составили  $\alpha'_1 \approx 0,19$  В/(Э·см) и  $\alpha'_2 \approx 0,02$  В/(Э·см). Видно, что значение МЭ напряжения падает на порядок при повороте структуры на  $90^\circ$  относительно направления магнитного поля в результате воздействия размагничивающего фактора.

На рис. 4 приведены полевые зависимости МЭ напряжения на частоте  $f_1$ . Зависимости имеют классический вид: МЭ напряжение сначала увеличивается от некоторого начального значения, достигая максимума в поле  $H_m$ , а затем монотонно убывает. Вид зависимости определяется пьезомагнитным модулем, т. е. видом зависимости первой производной магнитострикции по магнитному полю. Видно, что оптимальное поле  $H_m$  растет при увеличении угла между осью проволок и направлением магнитного поля. Зависимости имеют гистерезисный вид, обусловленный гистерезисом магнитострикции никеля.

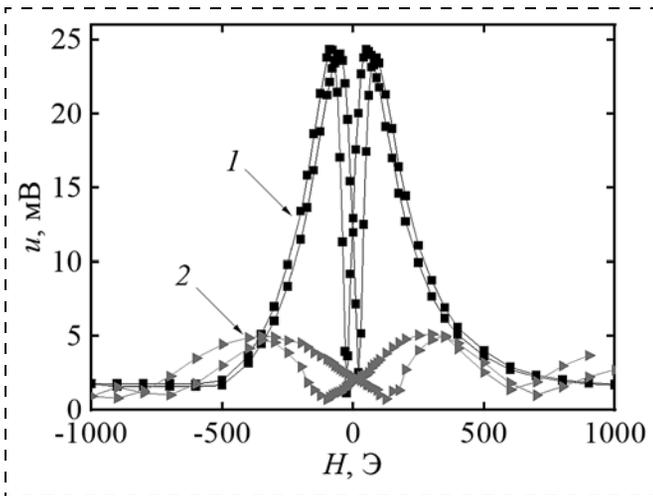


Рис. 4. Зависимость МЭ напряжения от магнитного поля на частоте  $f_1$  при намагничивании структуры параллельно (кривая 1) и перпендикулярно (кривая 2) оси проволок

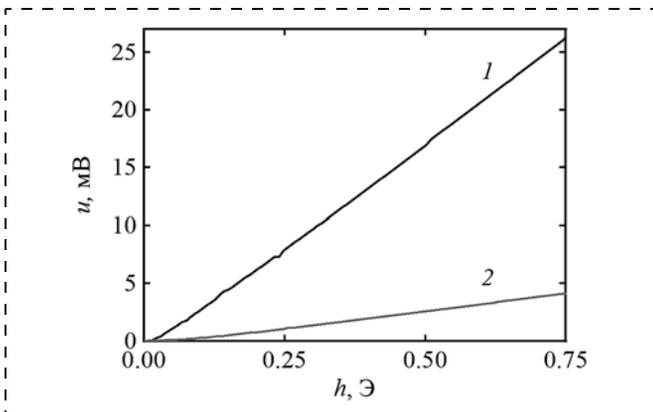


Рис. 5. Зависимости МЭ напряжения на частоте  $f_1$  от амплитуды переменного магнитного поля при намагничивании структуры параллельно (кривая 1) и перпендикулярно (кривая 2) оси проволок

терезисный вид, обусловленный гистерезисом магнитострикции никеля.

На рис. 5 приведены зависимости МЭ напряжения от амплитуды переменного магнитного поля на частоте  $f_1$  при намагничивании структуры параллельно и перпендикулярно оси проволок. Зависимости линейны во всем диапазоне амплитуд магнитных полей. При этом видно, что угол наклона прямой уменьшается примерно в 6,5 раз при увеличении угла между направлением магнитного поля и осью проволок от  $0$  до  $90^\circ$ .

### Обсуждение результатов

Определим резонансные частоты двумя способами. Во-первых, частоты изгибных колебаний структуры в форме диска можно оценить, используя следующую формулу [15]:

$$f = k_{ns} \frac{a}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{Y}{12\rho}}. \quad (1)$$

Здесь  $k_{ns}$  — константа;  $n$  — число узловых диаметров;  $s$  — число узловых окружностей;  $a$  — толщина диска;  $R$  — радиус диска;  $Y$  — модуль Юнга;  $\rho$  — плотность. Подставляя известные значения параметров структуры и материалов  $Y_m = 210$  ГПа,  $\rho_m = 8,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $Y_p = 59,5$  ГПа,  $\rho_p = 7,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> получаем значения резонансных частот  $f_1 \approx 8,2$  кГц и  $f_2 \approx 13,4$  кГц.

Также используя параметры материалов, эти частоты можно рассчитать с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics. Результаты моделирования приведены на рис. 6 (см. третью сторону обложки). Мода с частотой  $f_1 \approx 7,09$  кГц соответствует возбуждению колебаний с одной узловой окружностью, а на частоте  $f_2 \approx 14,99$  кГц — с одним узловым диаметром и одной узловой окружностью. Полученные с помощью моделирования и расчета частоты колебаний хорошо согласуются с результатами измерений.

Уменьшение МЭ напряжения  $u$  и увеличение оптимального магнитного поля  $H_m$ , наблюдаемое в эксперименте с увеличением угла между направлением магнитного поля и осью проволок никеля, обусловлено влиянием размагничивающего фактора структуры. Значение магнитного поля внутри проволоки можно оценить, как [16]

$$H_{in} \approx H - NM(H_{in}), \quad (2)$$

где  $N$  — размагничивающий фактор,  $M$  — намагниченность образца, равная  $M = \chi H_{in}$ . Поскольку значение  $\chi \gg 1$ , то значение намагниченности можно считать приближенно равной  $M \approx \mu H_{in}$ . Тогда уравнение (2) можно записать следующим образом:

$$H_{in} \approx \frac{H}{1 + \mu N}. \quad (3)$$

Значение размагничивающего фактора для проволочек составляет  $N_1 \approx 0,007$  при намагничивании вдоль оси проволоки и  $N_2 \approx 0,497$  при намагничивании перпендикулярно оси.

Представим магнитное поле в виде суммы двух составляющих  $\vec{H} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2$ , где  $\vec{H}_1$  — составляющая магнитного поля при намагничивании проволоки вдоль оси, а  $\vec{H}_2$  — составляющая магнитного поля при намагничивании проволоки перпендикулярно ее оси. Записав их проекции в виде  $H_1 = H \cos \varphi$  и  $H_2 = H \sin \varphi$  и учитывая, что  $H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2}$ , и подставляя в (3), получим [17]

$$H_{in} \approx H \sqrt{\frac{\cos^2 \varphi}{(1 + \mu N)^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{(1 + \mu N)^2}}. \quad (4)$$

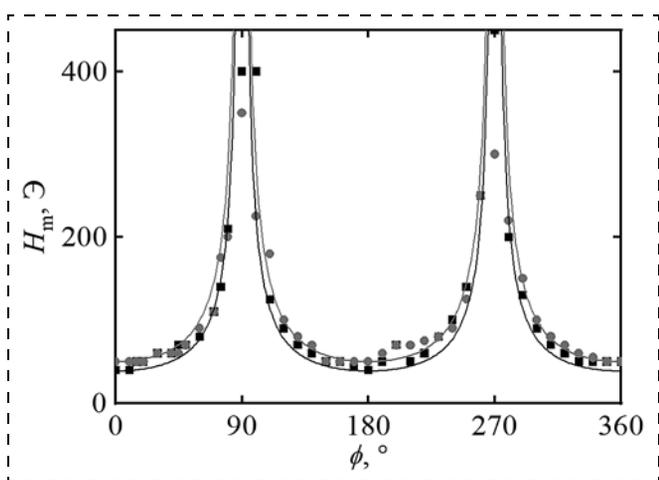


Рис. 7. Зависимость оптимального магнитного поля  $H_m$  на частоте  $f_1$  (■) и  $f_2$  (●) от угла между направлением магнитного поля и осью проволочек. Сплошные линии — расчет

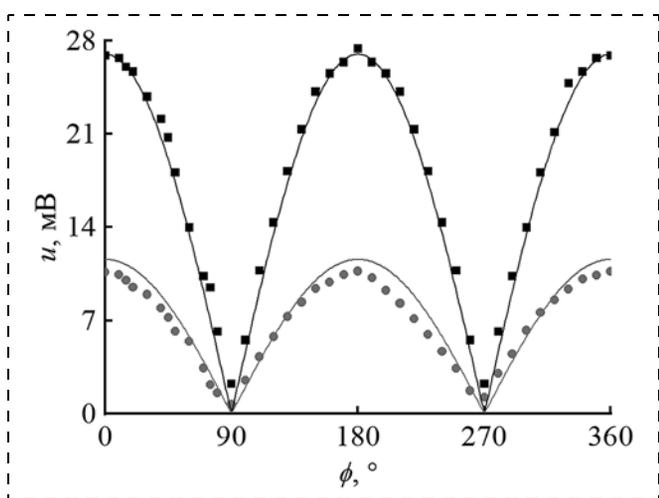


Рис. 8. Зависимость МЭ напряжения на частоте  $f_1$  (■) и  $f_2$  (●) от угла между направлением магнитного поля и осью проволочек. Сплошные линии — расчет

Тогда оптимальное магнитное поле можно определить, как

$$H_m \approx CH_{in} = CH \sqrt{\frac{\cos^2 \varphi}{(1 + \mu N)^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{(1 + \mu N)^2}}. \quad (5)$$

Подставляя значения констант для разных мод изгибных колебаний  $C_1 \approx 42$  и  $C_2 \approx 33$ , получим зависимости оптимального магнитного поля  $H_m$  от угла между направлением магнитного поля и осью проволочек никеля (рис. 7). Точками на графике показаны экспериментально измеренные зависимости, а линии — расчет. Видно, что зависимости достигают максимума с периодом  $180^\circ$ , когда магнитное поле направлено параллельно оси проволочек. С увеличением этого угла наблюдается уменьшение МЭ напряжения и увеличение магнитного поля  $H_m$ .

МЭ напряжение может быть определено как

$$u \approx A Q q \frac{d}{\varepsilon} h, \quad (6)$$

где  $A$  — константа, определяемая механическими свойствами и геометрией образца;  $Q$  — добротность резонанса;  $d/\varepsilon$  — отношение пьезомодуля ПЭ к его диэлектрической проницаемости;  $q$  — пьезомагнитный модуль ФМ. Подставляя (4) в (6), можно получить угловые зависимости МЭ напряжения на различных частотах. Принимая значения коэффициентов  $A_1 \sim 65,3$  и  $A_2 \sim 55,3$ , получим кривые, аппроксимирующие зависимость МЭ напряжения, показанную на рис. 8.

В обоих случаях для угловых зависимостей оптимального магнитного поля  $H_m$  и МЭ напряжения  $u$  теоретические кривые хорошо описывают экспериментальные данные.

### Заключение

Таким образом, в работе обнаружен и исследован линейный МЭ эффект в двухслойной структуре ЦТС-МВК. МВК был изготовлен на основе проволочек никеля диаметром 150 мкм. Измерены частотные и полевые зависимости МЭ напряжения для двух ориентаций магнитного поля: параллельно и перпендикулярно проволочкам никеля. Показано, что значение МЭ коэффициентов уменьшаются на порядок со значений 1,7 до 0,19 при изменении направления приложенного магнитного поля на  $90^\circ$ , что обусловлено размагничивающим фактором МВК. Измерены и рассчитаны угловые диаграммы МЭ напряжения и оптимального магнитного поля  $H_m$  от угла между его направлением и осями проволочек.

*Измерения частично выполнены на оборудовании центра коллективного пользования РТУ МИРЭА.*

### Список литературы

1. Nan C.-W., Bichurin, M. I., Dong, S., Viehland, D., Srinivasan, G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. // Journal of Applied Physics. 2008. Vol. 103. P. 142–149.
2. Viehland D., Wuttig M., McCord J., Quandt E. Magnetoelectric magnetic field sensors // MRS Bulletin. 2018. Vol. 43, N. 11. P. 834–840.
3. Fedulov F., Fetisov L. Vibrational energy harvesting device with magnetic tip mass. // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 211. P. 05001.
4. Leung C. M., Li J., Viehland D., Zhuang X. A review on applications of magnetoelectric composites: from heterostructural uncooled magnetic sensors, energy harvesters to highly efficient power converters // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. Vol. 51, N. 26. P. 263002.
5. Elhajar R., Law C., Pegoretti A. Magnetostrictive polymer composites: Recent advances in materials, structures and properties. // Progress in Materials Science. 2018. Vol. 97. P. 204–229.
6. Chu Z., PourhosseiniAsl M., Dong S. Review of multilayered magnetoelectric composite materials and devices applications. // Journal of Physics D.: Applied Physics. 2018. Vol. 51. P. 243001.
7. Fetisov L. Y., Chashin D. V., Plekhanova D. D., Saveliev D. V., Fetisov Y. K. Electrical control of magnetoelectric effect in composite structures with single-crystal piezoelectrics // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2019. Vol. 470. P. 93–96.
8. Martins P., Lanceros-Méndez S. Polymer based magnetoelectric materials. // Advanced Functional Materials. 2013. Vol. 23, N. 27. P. 3371–3385.
9. MacroFiberComposite-pecypc. URL: <https://www.smart-material.com/MFC-product-main.html> (дата обращения: 10. 11. 2021).
10. Wang Y., Gray D., Berry D., Gao J., Li M., Li J., Viehland D. An extremely low equivalent magnetic noise magnetoelectric sensor. // Advanced Materials. 2011. Vol. 23, N. 11. P. 4111–4114.
11. Fetisov Y., Chashin D., Saveliev D., Fetisov L., Shamonin M. Anisotropic magnetoelectric effect in a planar heterostructure comprising piezoelectric ceramics and magnetostrictive fibrous composite // Materials. 2019. Vol. 12. P. 3228.
12. Newnham R., Skinner D., Cross L. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites // Materials Research Bulletin. 1978. Vol. 13, N. 5. P. 525–536.
13. Chashin D. V., Burdin D. A., Fetisov L. Y., Ekonomov N. A., Fetisov Y. K. Precise measurements of magnetostriction of ferromagnetic plates // Journal of Siberian Federal University – Mathematics and Physics. 2018. Vol. 11, N. 1. P. 30–34.
14. Srinivasan G., Rasmussen E. T., Gallegos J., Srinivasan R., Bokhan Yu. I., Laletin V. M. Magnetoelectric bilayer and multilayer structures of magnetostrictive and piezoelectric oxides. // Physical Review B. 2001. Vol. 64. P. 214408.
15. Timoshenko S., Young D. Vibration problems in engineering, New York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1961.
16. Joseph R. I., Schlomann E. Demagnetizing field in nonellipsoidal bodies // Journal of Applied Physics. 1965. Vol. 36. P. 1579–1593.
17. Fedulov F. A., Saveliev D. V., Chashin D. V., Odinkov S. B., Kuznetsov A. S., Fetisov Y. K. Anisotropy of magnetoelectric effects in a planar heterostructure comprising a piezoelectric substrate and a ferromagnetic grating // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2021. Vol. 547. P. 168943.

D. V. Saveliev, Postgraduate Student, Engineer, [dimsav94@gmail.com](mailto:dimsav94@gmail.com),  
V. I. Musatov, Undergraduate, Researcher Engineer,  
MIREA – Russian University of Technology, Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author:

Saveliev D. V., Postgraduate Student, MIREA – Russian University of Technology, Moscow 119454, Russian Federation, e-mail: [dimsav94@gmail.com](mailto:dimsav94@gmail.com)

## A New Type of Magnetic Material for Anisotropic Magnetoelectric Effect

Received on February 03, 2022

Accepted on April 04, 2022

*Magnetostrictive fiber composites (MFC) based on nickel wires with a diameter of 150  $\mu\text{m}$ , arranged parallel to each other and immersed in a polymer matrix, were fabricated. The field and angular dependences of the MFC magnetostriction have been investigated. Direct magnetoelectric (ME) effect in a two-layered composite structure consisting of a layer of PZT and MFC piezoelectric ceramics has been studied. The frequency, field, and angular dependences of the magnetoelectric (ME) voltage in the PZT-MFC structure are obtained. The highest ME coefficient  $\alpha_1 = 1.7 \text{ V}/(\text{Oe} \cdot \text{cm})$  was obtained at a frequency of 7.86 kHz with a parallel orientation of the magnetic field relative to the wires. The anisotropy of the ME effect was found. It arises due to the anisotropy of the MFC magnetostriction. It is shown that as a result of the influence of the demagnetizing factor ME voltage decreases with an increase in the angle between the direction of the magnetic field and the axis of the wires. At the same time magnetic field  $H_m$  in which ME voltage reaches its maximum increases. A theoretical approach to the change in the ME voltage from the angle between the direction of the magnetic field and the axis of the wires is presented as well.*

**Keywords:** magnetoelectric effect, magnetostriction, anisotropy, composite structure, lead zirconate-titanate, nickel, fiber composite, resonance, demagnetizing factor, magnetic field

For citation:

**Saveliev D. V., Musatov V. I.** A New Type of Magnetic Material for Anisotropic Magnetolectric Effect, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 187–192.

DOI: 10.17587/nmst.24.187-192

## Acknowledgement:

*The measurements were partially performed using the equipment of the Joint Center for Collective Use of RTU MIREA.*

*The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No 20-32-90190.*

## References

1. Nan C.-W., Bichurin M. I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetolectric composites: Historical perspective, status, and future directions, *Journal of Applied Physics*, 2008, vol. 103, pp. 142–149.
2. Viehland D., Wuttig M., McCord J., Quandt E. Magnetolectric magnetic field sensors, *MRS Bulletin*, 2018, vol. 43, no. 11, pp. 834–840.
3. Fedulov F., Fetisov L. Vibrational energy harvesting device with magnetic tip mass, *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 211, p. 05001.
4. Leung C. M., Li J., Viehland D., Zhuang X. A review on applications of magnetolectric composites: from heterostructural uncooled magnetic sensors, energy harvesters to highly efficient power converters, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, vol. 51, no. 26, p. 263002.
5. Elhajjar R., Law C., Pegoretti A. Magnetostrictive polymer composites: Recent advances in materials, structures and properties, *Progress in Materials Science*, 2018, vol. 97, pp. 204–229.
6. Chu Z., PourhosseiniAsl M., Dong S. Review of multilayered magnetolectric composite materials and devices applications, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, vol. 51, p. 243001.
7. Fetisov L. Y., Chashin D. V., Plekhanova D. D., Saveliev D. V., Fetisov Y. K. Electrical control of magnetolectric effect in composite structures with single-crystal piezoelectrics, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 470, pp. 93–96.
8. Martins P., Lanceros-Méndez S. Polymer based magnetolectric materials, *Advanced Functional Materials*, 2013, vol. 23, no. 27, pp. 3371–3385.
9. MacroFiberComposite. URL: <https://www.smart-material.com/MFC-product-main.html> (accessed on 10. 11. 2021).
10. Wang Y., Gray D., Berry D., Gao J., Li M., Li J., Viehland D. An extremely low equivalent magnetic noise magnetolectric sensor, *Advanced Materials*, 2011, vol. 23, no. 11, pp. 4111–4114.
11. Fetisov Y., Chashin D., Saveliev D., Fetisov L., Shamonin M. Anisotropic magnetolectric effect in a planar heterostructure comprising piezoelectric ceramics and magnetostrictive fibrous composite, *Materials*, 2019, vol. 12, p. 3228.
12. Newnham R., Skinner D., Cross L. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites, *Materials Research Bulletin*, 1978, vol. 13, no. 5, pp. 525–536.
13. Chashin D. V., Burdin D. A., Fetisov L. Y., Ekonomov N. A., Fetisov Y. K. Precise measurements of magnetostriction of ferromagnetic plates, *Journal of Siberian Federal University — Mathematics and Physics*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 30–34.
14. Srinivasan G., Rasmussen E. T., Gallegos J., Srinivasan R., Bokhan Yu. I., Laletin V. M. Magnetolectric bilayer and multilayer structures of magnetostrictive and piezoelectric oxides, *Physical Review B*, 2001, vol. 64, p. 214408.
15. Timoshenko S., Young D. Vibration problems in engineering, New York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1961.
16. Joseph R. I., Schlomann E. Demagnetizing field in nonellipsoidal bodies, *Journal of Applied Physics*, 1965, vol. 36, pp. 1579–1593.
17. Fedulov F. A., Saveliev D. V., Chashin D. V., Odinkov S. B., Kuznetsov A. S., Fetisov Y. K. Anisotropy of magnetolectric effects in a planar heterostructure comprising a piezoelectric substrate and a ferromagnetic grating, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, vol. 547, p. 168943.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.382

DOI: 10.17587/nmst.24.193-198

**В. И. Шаломанов**, инженер 2 кат., shalomanov@mirea.ru,  
**А. А. Золотарев**, канд. техн. наук, доц., zolotarev@mirea.ru  
Российский технологический университет — РТУ МИРЭА

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ С НИЗКИМ УРОВНЕМ ШУМА НА ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ ФАУНДРИ РФ

Поступила в редакцию 16.12.2021

*Представлены результаты моделирования широкополосного усилителя мощности в полос частот 0,1...4 ГГц с низким уровнем шума с помощью моделирования в САПР AWR Microwave. Проведен анализ существующих схем и предложен вариант схемы широкополосного усилителя мощности с низким уровнем шума на элементной базе фаундри Российской Федерации. В качестве прототипа использовали схему Дарлингтона. В результате моделирования получены характеристики, не уступающие по своим значениям иностранным аналогам, что позволяет сделать вывод о возможности создания широкополосного усилителя мощности в полосе частот 0,1...4 ГГц на базе фаундри в РФ.*

**Ключевые слова:** усилитель, мощность, частота, шум, фаундри, СВЧ техника, СВЧ технология, МИС, МШУ

Усилители мощности всегда являлись основными компонентами сверхвысокочастотных (СВЧ) систем (радиолокация, радиосвязь, информационно-телекоммуникационные системы и другие), а их параметры всегда зависят от того, в какой области они будут использованы [1].

В самом начале развития СВЧ техники и СВЧ технологий для создания усилителей в основном использовали электронные лампы, такие как клистроны, магнетроны или лампы бегущей и обратной волны. Стремительное развитие твердотельной электроники привело к замене электровакуумных приборов на твердотельные. Полупроводниковые приборы имеют ряд преимуществ: надежность, возможность эксплуатации в неблагоприятных условиях, размер и стоимость.

Современные усилители мощности с низким уровнем шума (малошумящие усилители — МШУ) находят широкое применение в радиоприемных трактах различного назначения, где имеется необходимость получения максимальной чувствительности устройства [2].

В рамках этой работы было проведено моделирование твердотельного усилителя мощности в

диапазоне частот 0,1...4 ГГц, с уровнем шума не более 2,5, характеристики усилителя приведены в табл. 1.

Для моделирования была использована библиотека стандартных элементов rHEMNT05D отечественной фабрики АО "Светлана — Рост". Моделирование проводили в САПР AWR Microwave.

В качестве прототипа была использована классическая схема усилителя Дарлингтона.

По схеме Дарлингтона транзисторы имеют параллельную отрицательную обратную связь по на-

Таблица 1

Характеристики моделируемого усилителя мощности

Параметр	Обозначение	Требования ГЗ
Диапазон рабочих частот, ГГц	$\Delta f$	0,1...4
Коэффициент усиления в диапазоне рабочих частот, дБ	$K_y$	> 12
Неравномерность коэффициента усиления, дБ	$\Delta K_y$	2
Коэффициент шума, дБ	$K_{ш}$	< 2,5

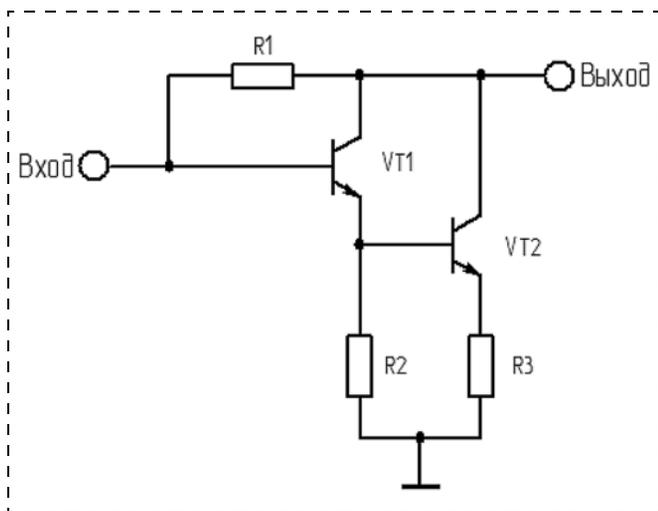


Рис. 1. Принципиальная схема усилителя Дарлингтона

пряжению и отличаются повышенным выходным напряжением на нагрузке с малым сопротивлением. На рис. 1 приведена эквивалентная схема усилителя Дарлингтона. Схема содержит транзисторы

VT1 и VT2, цепь параллельной обратной связи R1 между коллектором и базой транзистора VT1 и эмиттерные сопротивления R2 и R3.

Входной сигнал распределяется между транзисторами так, что напряжение база—эмиттер транзистора VT1 оказывается равным напряжению база—эмиттер транзистора VT2. Распределение входного напряжения осуществляется путем выбора номиналов эмиттерных резисторов R2 и R3.

Высокий коэффициент усиления — основное преимущество усилителей по схеме Дарлингтона. Такую схему часто используют в широкополосных усилителях.

Для моделирования был выбран транзистор с четырьмя затворами шириной 50 мкм. В схеме, представленной на рис. 2, также присутствует резистивная обратная связь и индуктивности, которые включаются в цепь питания транзисторов. На данной фабрике используется технологический процесс GaAs pHEMT [3]. HEMT — это так называемый транзистор с высокой подвижностью электронов — полевой транзистор, в котором для создания канала используется контакт двух полупроводни-

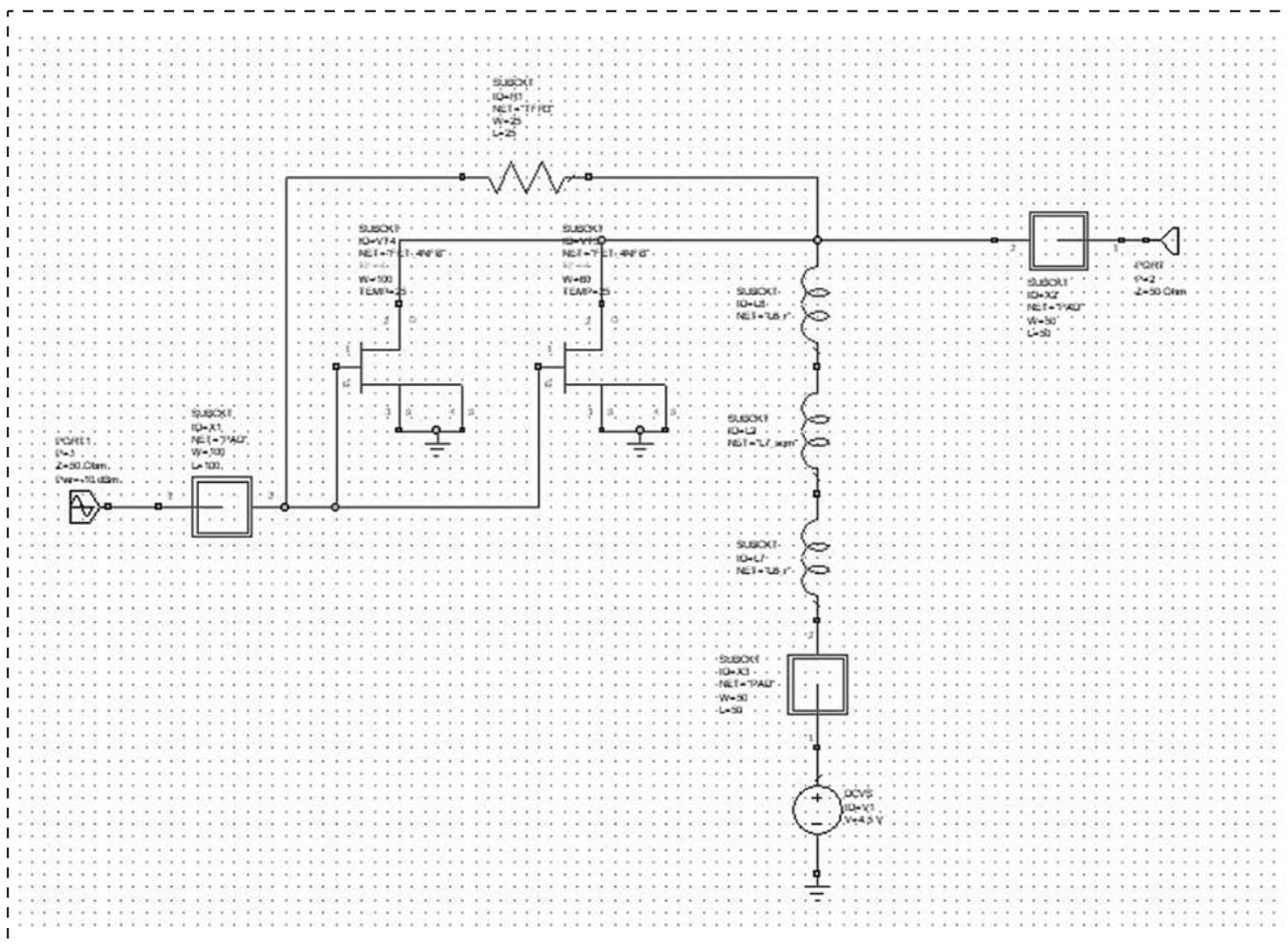


Рис. 2. Схема усилителя мощности на базе транзисторов фабрики РФ

ковых материалов с различной шириной запрещенной зоны. Транзистор, в котором не соблюдается соответствие параметра кристаллической решетки (расстояниями между атомами) слоев гетероперехода, называется псевдоморфным, или рНЕМТ. Обычно для создания гетероперехода выбирают материалы с одинаковым параметром кристаллической решетки [4, 5].

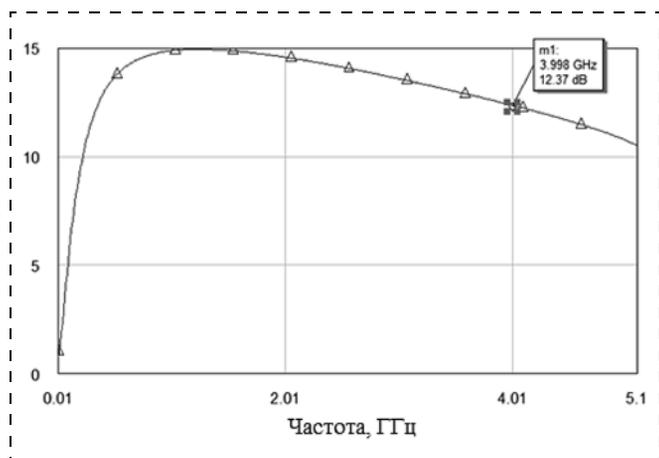


Рис. 3. Коэффициент усиления в диапазоне рабочих частот

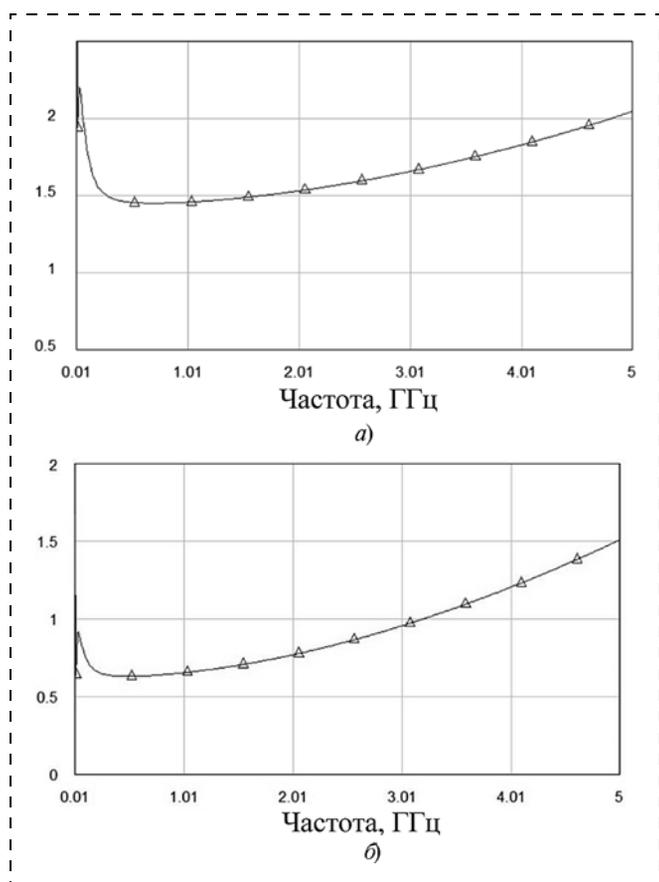


Рис. 4. Коэффициент шума в схеме с одним (а) и двумя (б) транзисторами

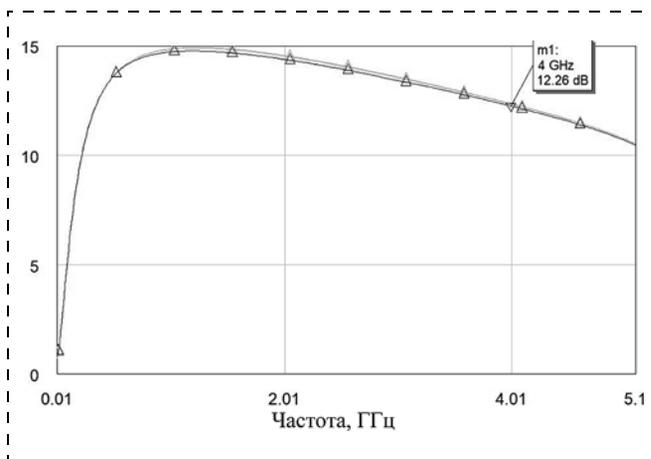


Рис. 5. Коэффициент усиления в диапазоне входных мощностей при постоянном уровне напряжения питания

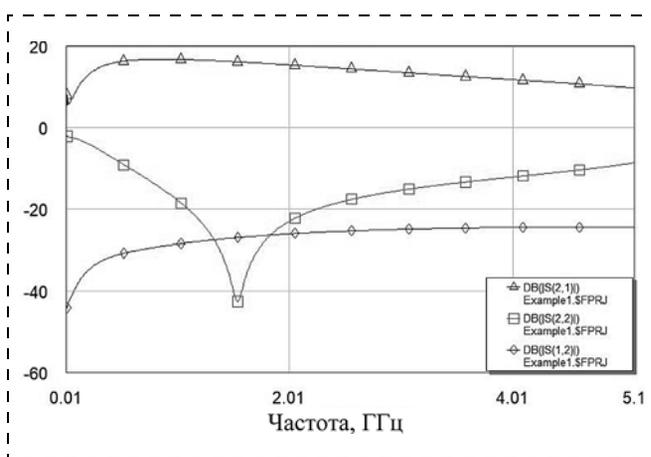


Рис. 6. S-параметры усилителя

Технологический процесс GaAs рНЕМТ является стандартным и имеется практически на всех фирмах, в которых оказывают услуги фаундри по изготовлению МИС (монолитная интегральная схема) СВЧ.

Данная технология позволяет изготавливать усилители мощности в диапазонах частот до 32 ГГц, выходной мощностью до 7 Вт, имеющие высокие усиления и КПД.

За счет резистивной обратной связи между стоком второго транзистора и затвором первого получаем на выходе более стабильную работу обоих транзисторов, более низкий уровень коэффициента стоячей волны (КСВ) и равномерный коэффициент усиления [6].

Достоинство резистивной обратной связи состоит в том, что имеется возможность подстройки режима работы транзистора путем подбора параметров напряжения.

На рис. 3 представлен коэффициент усиления в диапазоне рабочих частот. Из графика видно, что коэффициент усиления в диапазоне частот

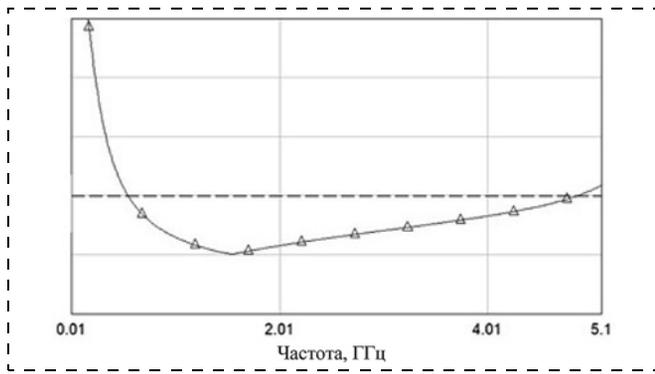


Рис. 7. КСВ усилителя мощности

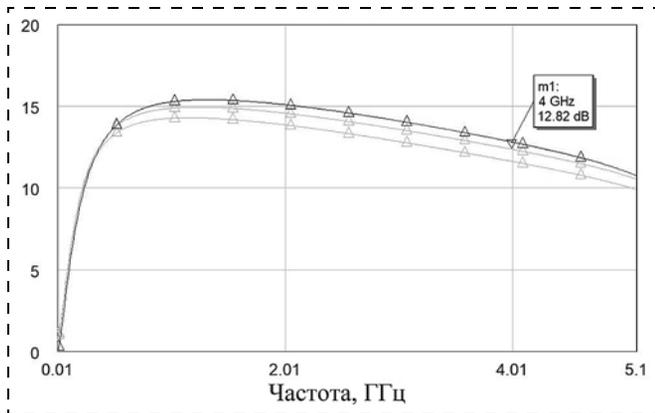


Рис. 8. Коэффициент усиления при различном уровне напряжения питания (3,5 В, 4,5 В, 6 В)

0,1...4 ГГц выше 12 дБ, а по уровню 10 дБ диапазон частот получается 0,1...5 ГГц.

Коэффициент шума удалось снизить путем включения второго малошумящего транзистора в схему. Графики представлены на рис. 4. Все транзисторы вносят вклад в общий шум, но основное значение обычно имеет шум первого транзистора, так как он усиливается всеми последующими транзисторами. Отсюда и метод борьбы с высоким коэффициентом шума — подбор малошумящих транзисторов в первом каскаде [7—11].

Представленная схема усилителя работает в диапазоне входных мощностей от  $-10$  до  $0$  дБм (рис. 5), коэффициент усиления практически не меняется. На рисунке 6 и 7 представлены графики S-параметров и КСВ. КСВ для малошумящего усилителя является оптимальным и не превышает 2 (штриховая линия на рис. 7).

При увеличении напряжения питания коэффициент усиления растет (рис. 8), но ухудшаются такие параметры, как коэффициент шума. В данном случае наиболее эффективным будет выбор напряжения питания 4,5 В.

В итоге получаем усилитель, не уступающий по определенным параметрам усилителям других компаний, производство которых осуществляется за рубежом [12—14].

В заключение стоит отметить (табл. 2), что это всего лишь моделирование, и параметры получены

Таблица 2

Усилители мощности на рынке

Наименование	Производитель	Диапазон частот, ГГц	Тех. процесс	$K_{ш\max}$ , дБм
1324УВ9У	НПП "Пульсар"	0...6	GaAs ГБТ	3,9
1324УВ11У	НПП "Пульсар"	0...4	GaAs рНЕМТ	3
HMC637ALP5E	Analog Devices	0,1...6	GaAs рНЕМТ	4
SPF5043Z	Qorvo	0,04...4	GaAs рНЕМТ	4
GRF2014	GuerillaRF	0,05...3,8	GaAs	3,5
PHA-102+	Mini Circuits	0,05...6	рНЕМТ	3,5
TQL9047	Qorvo	0,05...4,2	Е-рНЕМТ	3,5
PGA-103+	Mini Circuits	0,05...4	Е-рНЕМТ	3,5
	<b>РТУ МИРЭА</b>	<b>0,1...4*</b>	<b>рНЕМТ</b>	<b>1,5*</b>

\* Моделирование в AWR Microwave.

Таблица 3

Результаты моделирования

Параметр	Обозначение	Требования ТЗ	Полученный результат моделирования
Диапазон рабочих частот, ГГц	$\Delta f$	0,1...4	0,1...4
Коэффициент усиления в диапазоне рабочих частот, дБ	$K_y$	$> 12$	12,5...15
Неравномерность коэффициента усиления, дБ	$\Delta K_y$	2	2,5
Коэффициент шума, дБ	$K_{ш}$	$< 2,5$	1,2

в идеальном расчетном случае, но на отечественной фондрии имеется возможность создания усилителя мощности с более низкими шумовыми характеристиками, в отличие от аналогов, представленных на рынке.

Полученные характеристики в ходе моделирования представлены в табл. 3.

*Данная работа выполнена в рамках соглашения с Минобрнауки России от 01.09.2021 № 075-15-2021-689, уникальный идентификационный номер 2296.61321X0010.*

### Список литературы

1. Сечи Ф., Буджатти М. Мощные твердотельные СВЧ-усилители: учебник для студентов вузов, обучающихся по спец. "Мир Радиоэлектроники". — Изд. 1-е, — М.: Техносфера, 2016. 416 с.
2. Шаломанов В. И., Сидорова И. Н., Морозиков В. В. Анализ рынка радиоэлектронной аппаратуры: твердотельные усилители С-диапазона // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2020. Вып. 4. С. 49—56.
3. Золотарев А. А. Применение металломатричного композита на основе алюминия и карбида кремния для создания корпусов СВЧ GaN транзисторов // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2018. Вып. 2 (249). С. 48—52.
4. Meghdadi M., Medi A. Design of 6—18GHz HighPower Amplifier in GaAs pHEMT Technology // IEEE Transactions on MTT. 2017. Vol. 65. Iss. 7.

5. Tran P. 2 to 18 GHz HighPower and High Efficiency Amplifiers // 2017 IEEE International Microwave Symposium, 2017.

6. Litchfield M., Komiak J. A 6—18GHz 40W Reactively Matched GaN MMIC Power Amplifier // 2018 IEEE International Microwave Symposium, 2018.

7. Козловский Э. Ю., Селезнев Б. И., Дмитриев В. А., Штейнгарт А. П. Малошумящие СВЧ полевые транзисторы на арсениде галлия для систем связи // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2011. № 1, 2. С. 80—85.

8. Алмазов-Долженко К. И. Коэффициент шума и его измерение на СВЧ. М.: Научный мир, 2000. 240 с.

9. Мокеров В. Г., Бабак Л. И., Федоров Ю. В., Черкашин М. В. и др. Разработка комплекта монолитных малошумящих усилителей X-диапазона на основе 0,15 мкм GaAs pHEMT технологии // Доклады ТУСУР. 2010. № 2 (22). Ч. 1. С. 105—117.

10. Козловский Э. Ю., Селезнев Б. И. Моделирование СВЧ малошумящего pHEMT транзистора с применением САПР Microwave Office // Вестник Новгородского государственного университета. Сер.: Техн. науки. 2012. № 68. С. 41—45.

11. Кищинский А. А. Сверхширокополосные твердотельные усилители мощности СВЧ-диапазона: схемотехника, конструкции, технологии // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сборник статей VII Всероссийской конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2018.

12. Analog devices. — URL: <https://www.analog.com/ru/index.html> (дата обращения: 23.10.2020).

13. Qorvo products. — URL: <https://www.qorvo.com/products> (дата обращения: 20.10.2020).

14. All New Products. — URL: [https://www.minicircuits.com/products/ALL\\_PRODUCTS.html](https://www.minicircuits.com/products/ALL_PRODUCTS.html) (дата обращения: 21.10.2020).

---

V. I. Shalomanov, Engineer of the 2nd category, shalomanov@mirea.ru,  
A. A. Zolotarev, Ph. D., Associate Professor, zolotarev@mirea.ru,  
MIREA

*Correspondent author:*

Shalomanov Viacheslav I., Engineer of the 2nd category MIREA, shalomanov@mirea.ru

## Modeling a Broadband Power Amplifier with a Low Noise on the Element Base of Foundry Russia

*Received on December 16, 2021*

*Accepted on February 24, 2022*

*The article presents the results of modeling a wideband power amplifier in the frequency bands of 0.1–4 GHz with a low noise level using simulation in CAD AWR Microwave. The analysis of the existing circuits is carried out and a variant of the circuit of a broadband power amplifier with a low noise level on the element base of the foundry of the Russian Federation is proposed. The Darlington circuit was used as a prototype. According to the Darlington scheme, transistors have parallel negative voltage feedback and are distinguished by an increased output voltage across a low resistance load. A transistor with four gates 50 μm wide was chosen for the simulation. The circuit also contains resistive feedback and inductors, which are included in the power supply circuit of the transistors. This foundation uses the GaAs pHEMT technological process. This technological process is standard and is available in almost all firms that provide services for the foundation MIS (monolithic integrated circuit) microwave.*

*This technology makes it possible to manufacture power amplifiers in the ranges up to 32 GHz and output power up to 7 W. They have high gain, efficiency and a wide frequency range.*

*As a result of the simulation, characteristics are obtained that are not inferior in their values to foreign counterparts, which allows us to conclude that it is possible to create a broadband power amplifier in the 0.1-4 GHz frequency band based on the foundry in the Russian Federation.*

**Keywords:** amplifier, power, frequency, noise, foundry, SHF-technique, SHF-technology, MIC

*For citation:*

**Shalomanov V. I., Zolotarev A. A.** Modeling a Broadband Power Amplifier with a Low Noise on the Element Base of Foundry Russia, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 193—198.

DOI: 10.17587/nmst.24.193-198

## References

1. **Sechi F., Budzhatti M.** Moshchnye tverdotel'nye SVCh-usiliteli: uchebnik dlya studentov vuzov, obuchayushchihsya po spec., *Mir Radioelektroniki*, — Izd. 1-e, Moscow, Tekhnosfera, 2016, 416 p.
2. **Shalomanov V. I., Sidorova I. N., Morozikov V. V.** Analiz rynka radioelektronnoj apparatury: tverdotel'nye usiliteli S-diapazona, *Elektronnaya tekhnika Seriya 2 poluprovodnikovye pribory*, 2020, vol. 4, pp. 49—56 (in Russian).
3. **Zolotarev A. A.** Primenenie metallomatrchnogo kompozita na osnove alyuminiya i karbida kremniya dlya sozdaniya korpusov SVCh GaN tranzistorov, *Elektronnaya tekhnika, ser. 2, Poluprovodnikovye pribory*, 2018, vol. 2 (249), pp. 48—52.
4. **Meghdadi M., Medi A.** Design of 6—18GHz HighPower Amplifier in GaAs pHEMT Technology, *IEEE Transactions on MTT*, 2017, vol. 65, iss. 7.
5. **Tran P.** 2 to 18 GHz HighPower and High Efficiency Amplifiers, *2017 IEEE International Microwave Symposium*, 2017.
6. **Litchfield M., Komiak J.** A 6—18GHz 40W Reactively Matched GaN MMIC Power Amplifier, *2018 IEEE International Microwave Symposium*, 2018.
7. **Kozlovskij E. Yu., Seleznev B. I., Dmitriev V. A., Shtejngart A. P.** Maloshumyashchie SVCh polevye tranzistory na arsenide galliya dlya sistem svyazi, *Sistemy i sredstva svyazi, telev-ideniya i radioveshchaniya*, 2011, no. 1, 2, pp. 80—85 (in Russian).
8. **Almazov-Dolzhenko K. I.** Koefficient shuma i ego izmenenie na SVCh, Moscow, Nauchnyj mir, 2000, 240 p.
9. **Mokerov V. G., Babak L. I., Fedorov Yu. V., Cherka-shin M. V.** i dr. Razrabotka komplekta monolitnyh maloshumyashchih usilitelej X-diapazona na osnove 0,15 mkm GaAs pHEMT tekhnologii, *Doklady TUSUR*, 2010, no. 2 (22). Ch. 1, pp. 105—117.
10. **Kozlovskij E. Yu., Seleznev B. I.** Modelirovanie SVCh maloshumyashchego pHEMT tranzistora s primeneniem SAPR Microwave Office, *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta, ser.: Tekhn. nauki*, 2012, no. 68, pp. 41—45.
11. **Kishchinskij A. A.** Sverhshirokopolosnye tverdotel'nye usiliteli moshchnosti SVCh-diapazona: skhemotekhnika, konstrukcii, tekhnologii, *Elektronika i mikroelektronika SVCh. Sbornik statej VII Vserossijskoj konferencii*, Saint-Petersburg, Izd-vo SPbGETU "LETI", 2018.
12. **Analog** devices. URL: <https://www.analog.com/ru/index.html> (accessed 23.10.2020).
13. **Qorvo** products. URL: <https://www.qorvo.com/products> (accessed 20.10.2020).
14. **All New** Products. URL: [https://www.minicircuits.com/products/ALL\\_PRODUCTS.html](https://www.minicircuits.com/products/ALL_PRODUCTS.html) (accessed 21.10.2020).

**А. С. Койгеров**, канд. техн. наук, доц., a.koigerov@gmail.com,  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина)

## ДОСТИЖЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ И ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ В МИКРОПРИБОРАХ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

*Поступила в редакцию 13.12.2021*

*Представлен краткий обзор проблем и современное состояние микроприборов акустоэлектроники на поверхностных акустических волнах с точки зрения достижения предельных параметров. Показано, что этапы структурного и параметрического синтеза топологии являются ключевыми аспектами при проектировании устройств с предельными параметрами. Приведены некоторые результаты исследований и разработок устройств на поверхностных акустических волнах, полученные в области создания сверхузкополосных фильтров, сверхширокополосных линий задержек и уникальных радиометок на основе многополоскового ответвителя. Представлен фильтр с минимальной неравномерностью группового времени запаздывания для класса трансверсальных фильтров. Показано, что получение устройств с предельными и критическими параметрами возможно только на основе сопряжения разработки конструктивно-технологических, материаловедческих, физических и схмотехнических принципов построения. Описаны современные подходы и методы анализа рабочих характеристик устройств на поверхностных акустических волнах и волновых процессов в пьезоэлектрических подложках.*

**Ключевые слова:** *поверхностные акустические волны, резонатор, модель связанных мод, метод конечных элементов, пьезоэлектрическая подложка, широкополосный фильтр, ниобат лития, акустоэлектроника, линия задержки*

### Введение

В настоящее время микроприборы акустоэлектроники [1, 2] (фильтры, линии задержки, резонаторы и т.д.) применяют в различных радиотехнических системах. Кроме того их используют в микросистемной технике в качестве основы для микроминиатюрных сенсоров различного назначения — датчиков физических величин (температура, микроперемещение, ускорение и т.д.). В диапазоне от десятков мегагерц до 2.5 ГГц широкое распространения получили микроприборы на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Область технических применений микроприборов на ПАВ стремительно развивается. Это стимулируется как общей тенденцией микроминиатюризации сложных электронных систем, так и уникальными свойствами поверхностных волн.

На основе мировых тенденций можно выделить следующие ближайшие перспективы развития [3] микроприборов на ПАВ:

- повышение рабочих частот;
- улучшение температурной стабильности;
- увеличение входной мощности проходящего сигнала;
- обеспечение критических и предельных характеристик микроприборов на ПАВ:
  - ✓ снижение вносимого затухания;
  - ✓ увеличение гарантированного относительного затухания в полосе заграждения;
  - ✓ уменьшение неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания;
  - ✓ уменьшение неравномерности группового времени задержки (ГВЗ) в полосе пропускания;
  - ✓ повышение селективности (амплитудно-частотные характеристики полосового фильтра должны обладать крутыми скатами ввиду близко расположенных полос частот соседних систем связи);
  - ✓ минимизация коэффициента стоячей волны (КСВ).

- обеспечение независимости от элементной базы иностранного производства;
- переход на современные принципы компоновки радиоэлектронной аппаратуры (РЭА);
- повышение плотности монтажа;
- снижение массогабаритных характеристик аппаратуры;
- повышение надежности;
- создание интеллектуальных устройств на ПАВ с новыми возможностями;
- создание класса приборов с использованием пьезоэлектрических полупроводников или слоистых структур пьезоэлектрик — полупроводник [4].

Актуальность исследований и разработки новых компонентов акустоэлектроники обусловлена возрастающей потребностью в таких элементах для модернизации и создания новых систем связи. Современные СВЧ устройства — радиопередатчики, приемники, системы передачи информации на радиочастоте постоянно развиваются, появляются все больше и больше новых беспроводных сервисов и протоколов обмена данными, поэтому возникает потребность в различных полосах пропускания и несущих частотах. С ростом объема и скорости передаваемой информации необходимо обеспечивать во многих задачах расширение относительной полосы пропускания. При этом происходит "уплотнение" частотного спектра в радиоканале и появляется потребность в крутых скатах АЧХ. Эти и другие задачи постоянно требуют новых номиналов фильтров на ПАВ, зачастую с требованиями по электрическим параметрам, которые приближаются к предельно возможным вообще для данного класса устройств.

Несмотря на то, что такие технологии, как *FBAR* (*free-standing bulk acoustic resonator*) [1] и цифровая обработка сигналов составляют серьезную конкуренцию и сокращают рынок устройств на ПАВ, достижения в области предельных и критических параметров для микроприборов на ПАВ позволяют выдерживать конкуренцию в некоторых направлениях. Например, системы, которые требуют низкого энергопотребления и высокого динамического диапазона по дальности действия (радары, базовые станции и спутники) по-прежнему включают фильтры на ПАВ в тракты приемной аппаратуры благодаря их отличным характеристикам по сравнению с другими технологиями. Постоянные улучшения в характеристиках устройств ПАВ и стремление достичь предельно возможных параметров являются необходимым условием, чтобы опережать технические достижения конкурирующих технологий.

На основе анализа общих тенденций развития и задачи выдерживать конкуренцию со стороны других технологий ясно, что требуется не только усо-

вершенствование распространенных топологических решений на ПАВ, но и разработка и исследование новых конструкций микроприборов на ПАВ, способных достигать предельных и критических параметров.

В работе представлены краткий обзор проблем и современное состояние микроприборов акустоэлектроники на ПАВ с точки зрения достижения предельных параметров, а также некоторые результаты исследований и разработок, полученные в области создания фильтров на ПАВ, радиометок и датчиков физических величин, описан современный подход к анализу волновых процессов в пьезоэлектрических подложках.

## 1. Обзор основных направлений развития акустоэлектронных изделий

*Повышение рабочих частот.* Традиционно устройства на ПАВ занимают частотный диапазон от десятков мегагерц до 2,5 ГГц в серийном производстве. Рабочая частота  $f_0$  устройства на ПАВ определяется по формуле  $f_0 = V/\lambda$ , где  $V$  — скорость ПАВ,  $\lambda$  — длина акустической длины волны. Для преобразователей с шириной электрода  $\lambda/4$  и шагом  $\lambda/2$  очевидно, что задача повышения рабочих частот устройств на ПАВ связана с решением двух вопросов: 1) выбор материала с большой скоростью акустической волны; 2) увеличение разрешающей способности оборудования на всех этапах технологической цепочки для работы на малых длинах волн.

*Снижение вносимых потерь.* Снижение вносимых потерь устройств на ПАВ расширяет динамический диапазон приемной радиоэлектронной аппаратуры. Известны фильтры с вносимым затуханием менее 1 дБ, но, как правило, такое затухание обеспечивается на частотах ниже 500 МГц. Важным нюансом является и то, что многие такие фильтры не оптимальны с точки зрения других параметров, поэтому к данному вопросу нужно подходить осторожно и осмысленно. Потери на распространение, резистивные потери в металле электродов встречно-штыревого преобразователя (ВШП), потери на утечку и рассеивание акустических волн в объем подложки и другие источники потерь не позволяют "масштабировать" характеристики, полученные на частотах до 500 МГц в диапазон 2 ГГц и выше, без существенных искажений. Поэтому вопрос оценки потерь выходит на первый план.

*Улучшение температурной стабильности.* Температурная стабильность АЧХ ПАВ-устройств зависит от температурного коэффициента частоты (ТКЧ) и определяется пьезоэлектрическим материалом, из которых они сделаны. В последнее время для температурной стабилизации частотных характеристик все шире стали использовать технологию на основе нанесения пленки  $\text{SiO}_2$  на поверх-

ность пьезоэлектрического материала, соединение такого типа приводит к частичной компенсации ТКЧ [2, 5]. Также возрос интерес к неоднородным подложкам из отличающихся по толщине пьезоэлектрических и непьезоэлектрических материалов с различными свойствами, что позволяет решать задачу температурной компенсации. В частности, это позволяет технология ИНР (Incredible High-Performance) [6], где многослойная подложка фильтров состоит из основы (поддерживающей подложки), покрытой тонкими слоями: функциональным (например,  $\text{SiO}_2$ ) и пьезоэлектрическим (ниобат или танталат лития). Результаты исследования с использованием термокомпенсированных пластин  $\text{YXl}/42^\circ\text{LiTaO}_3/\text{кремний}$  представлены в работе [7], что позволило создать фильтр с малым уровнем возбуждения паразитных мод.

*Увеличение входной мощности проходящего сигнала.* Задача реализации фильтров на ПАВ с высокой входной мощностью на частотах более 2 ГГц, при которых минимальный размер электродных структур составляет 0,5...0,55 мкм является сложной и актуальной на сегодняшний день [8]. В данном вопросе важен выбор как топологического решения, так и материала подложки и электродов [3, 8].

## 2. Обеспечение критических характеристик микроприборов на ПАВ

Успешное решение задачи по созданию микроприборов на ПАВ с предельно достижимыми и критическими электрическими параметрами возможно только на основе сопряжения разработки конструктивно-технологических, материаловедческих, физических и схемотехнических принципов построения.

Особое место в этом процессе совершенствования акустоэлектронных устройств занимают исследования и разработка новых рациональных, но в то же время нетривиальных топологических и схемотехнических решений, поскольку неудачный выбор топологии на стадии проектирования не может быть восполнен даже самыми современными подходами расчета и оптимизации. Наиболее остро значимость выбора и поиска новых топологических решений появляется тогда, когда возможности базовых и наиболее популярных решений исчерпаны и дальнейшее развитие наталкивается на глубокие физические и технологические ограничения и противоречия.

Следует отметить, что несмотря на значительные успехи в области технологии изготовления планарных устройств вообще и акустоэлектронных

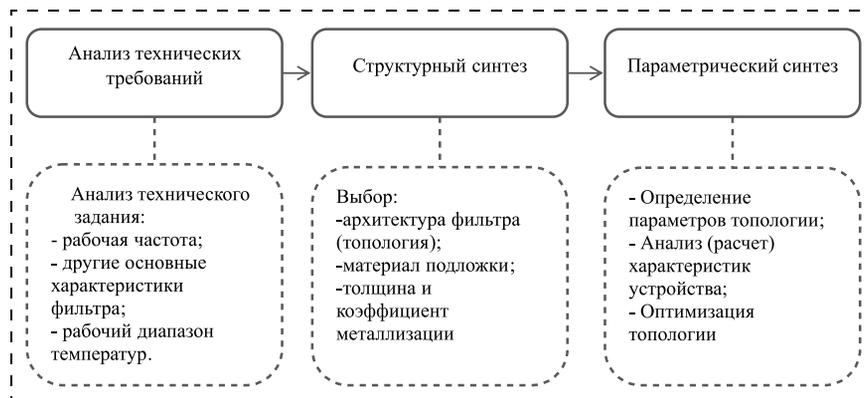


Рис. 1. Этапы проектирования микроприбора на ПАВ

в частности, топология и схемотехнические решения не претерпели существенных изменений и базируются в основном на следующих элементах: ВШП, отражатели в виде полосок и канавок, ответвители нескольких типов. Комбинация этих элементов, по сути, формирует топологии различного типа. Понимание физики работы и волновых процессов с сопряженными вторичными эффектами, от которых зависят рабочие характеристики устройств, помогает на начальной стадии разработки выбрать наиболее подходящее решение.

В задаче выбора топологии микроприбора на ПАВ можно выделить несколько этапов (рис. 1).

1. Анализ технических требований.

2. Структурный (архитектурный) синтез — выбор архитектуры или топологии, или поиск физической реализации прибора в базисе доступных решений либо из комбинации доступных элементов при достижении заданных параметров.

3. Параметрический синтез — определение параметров выбранной топологии, анализ и оптимизация параметров структуры (архитектуры) с учетом условий ее физической реализуемости.

В решении задачи синтеза этап структурного синтеза является центральным, так как все плюсы и минусы определяются выбранной архитектурой, т. е. фактическим принципом действия выбранного топологического решения. Успешное решение этой задачи в рамках традиционных подходов во многом определяется опытом разработчика и тем, насколько развита библиотека базовых элементов и доступных стандартных решений. При использовании новых принципов и нетривиальных топологических решений эта задача усложняется. Нужно четко и ясно понимать всю физику волновых процессов, а только потом переходить к моделированию этих процессов и анализу топологии. Таким образом, на данном этапе можно обойтись и без обращения к строгим математическим моделям, но необходимо оценить различные вторичные эффекты и вообще суть волновых процессов, а также возможности выбранных материалов и типа акустической волны.

На этапе параметрического синтеза непосредственно проводят анализ характеристик выбранной архитектуры по одному из известных и доступных способов расчета. На этом же этапе по результатам расчета выполняют оптимизацию параметров выбранной структуры.

Еще раз следует отметить, что достижение предельных и критических параметров возможно лишь за счет объединения нескольких аспектов, к которым относят правильный структурный синтез топологии, корректную оптимизацию на основе хорошо зарекомендовавшей теории расчета и должная технология изготовления, которая позволяет реализовать предложенную разработку с минимальными отклонениями.

### 3. Некоторые результаты исследований и разработок по реализации устройств с критическими параметрами

Накопленный опыт работы в сфере акустоэлектроники, а также анализ данных литературных источников [1, 2, 9] позволили свести в таблицу некоторые параметры полосовых фильтров, для которых можно провести оценку их критических и предельно достижимых параметров.

При анализе параметров полосовых фильтров на ПАВ, представленных в таблице, следует иметь в виду, что приведенные предельные значения параметров не могут быть реализованы в одном и том же фильтре одновременно. Например, минимальная относительная полоса пропускания реализуется на определенно выбранных топологиях и конструктивных решениях, при этом потери будут минимально возможными для выбранной топологии, но не предельно достижимыми вообще. На рис. 2 представлена АЧХ узкополосного фильтра на ПАВ на поперечных модах. Фильтр имеет вносимые

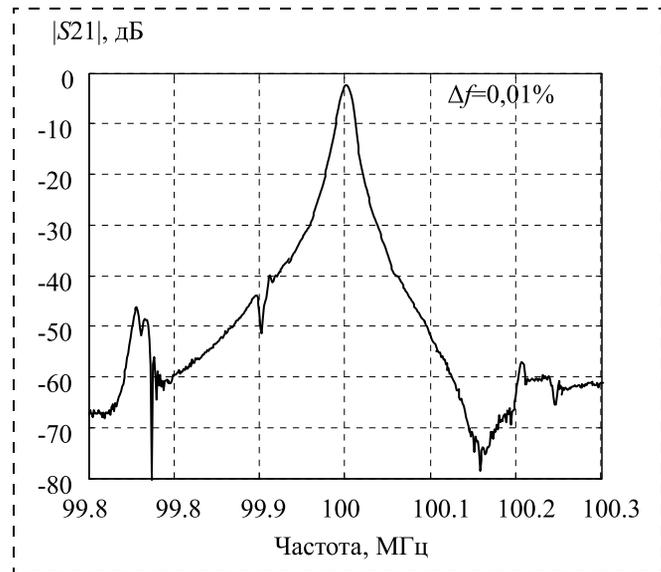


Рис. 2. АЧХ полосового фильтра А245-100

потери — 2,3 дБ, но при этом полоса на частоте 100 МГц составляет 10 кГц, что в пересчете в относительных значениях соответствует 0,01 %, что по сути является предельным оценочным значением. Из АЧХ явно видно, что значения коэффициента прямоугольности, так же как и подавление боковых лепестков далеки от предельных значений. Но в то же время по совокупности параметров фильтр является уникальным сверхузкополосным устройством.

Если рассмотреть возможность реализации широкополосных фильтров и линий задержек на ПАВ, то интересным образцом для анализа является А139-225. На представленной характеристике ГВЗ (рис. 3), видно, что среднее значение ГВЗ  $\approx 3,4$  мкс обеспечивается в полосе 250 МГц, при центральной частоте 225 МГц относительная полоса пропускания в данной линии задержки соответствует 110 %, что превышает предельные значения, указанные в таблице. При этом вносимые потери в ЛЗ составляют — 40 дБ, что является довольно большим значением.

Практика проектирования показывает, что при реализации одних предельно достижимых и критических параметров для устройств на ПАВ приходится снижать требования к другим. Поэтому очень важно находить грамотный компромисс и на этапе структурного синтеза правильно определиться с предпочтительной топологией, чтобы по возможности получить отличными важные технические по ТЗ параметры и приемлемые остальные электрические параметры.

Ввиду особенности физики работы устройств на ПАВ оптимизация одного параметра зачастую может привести к ухудшению другого параметра. Например, известно, что в трансверсальных фильтрах

#### Параметры полосовых фильтров на ПАВ

Наименование параметра	Параметры серийно выпускаемых устройств	Оценочные предельные значения
Минимальное вносимое затухание, дБ	1	0,4
Минимальная относительная полоса пропускания, %	0,02	0,01
Максимальная относительная полоса пропускания, %	50	100
Подавление боковых лепестков в АЧХ, дБ	60	90
Минимальный коэффициент прямоугольности	1,2	1,1
Подавление сигнала тройного прохода, дБ	45	60
Неравномерность АЧХ в полосе пропускания, дБ	$\pm 0,05$	$\pm 0,01$

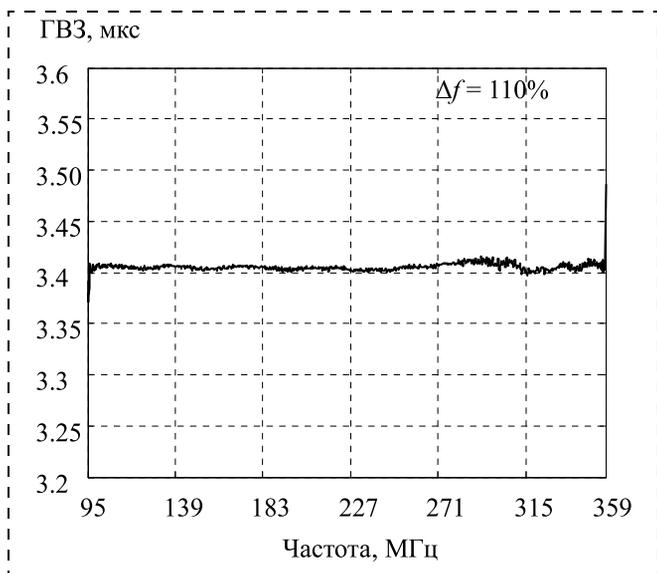


Рис. 3. ГВЗ линии задержки на ПАВ А139-225

на ПАВ при минимизации вносимых потерь неизбежно растет неравномерность АЧХ и ГВЗ вследствие увеличения сигнала тройного прохода [10]. Но ужесточение требований к электрическим характеристикам со стороны заказчика и потребителя РЭА и тенденции развития акустоэлектроники заставляют находить новые технические решения, которые еще широко не известны мировой обществу.

На рис. 4 представлена АЧХ и ГВЗ фильтра А446-120, по характеристикам которого четко видно, что стандартная реализация трансверсального фильтра будет иметь при минимально возможных

потерях для данной частоты неравномерность ГВЗ в 170 нс. В то же время, применяя новые схемотехнические решения, можно на практике получить неравномерность в 14 нс при потерях в 7 дБ, что, по сути, для данного класса фильтров с относительной полосой в 12,5 % является уникальным результатом. И хотя в данном случае ни один из отдельно взятых параметров и не является предельно достижимым, но совокупность рассмотрения всех параметров в целом, а это и относительная полоса пропускания, и вносимые потери, и неравномерность ГВЗ и АЧХ делают фильтр уникальным и сравнимым с лучшими мировыми образцами в данном сегменте, а возможно и одним из лучших.

Как уже говорилось ранее, возможности базовых и наиболее популярных решений исчерпаны и дальнейшее развитие наталкивается на глубокие физические и технологические ограничения и противоречия. Поэтому иногда новые нетривиальные на первый взгляд решения помогают преодолеть такие противоречия.

Еще один пример — радиометка на ПАВ [11]. Топологии традиционной конструкции и новой нетривиальной конструкции с многополосковым ответвителем в качестве компрессора представлены на рис. 5, а и б соответственно. Временной отклик радиометки представлен на рис. 6. Анализ основных параметров изготовленных радиометок на ПАВ по импульсному отклику показал, что минимальные вносимые потери не превышают значения 38 дБ. Уровень неравномерности амплитуды в измеренном импульсном отклике не превышает 5 дБ. Уровень ложных сигналов — не менее 23 дБ. Таким образом, новая уникальная конструкция

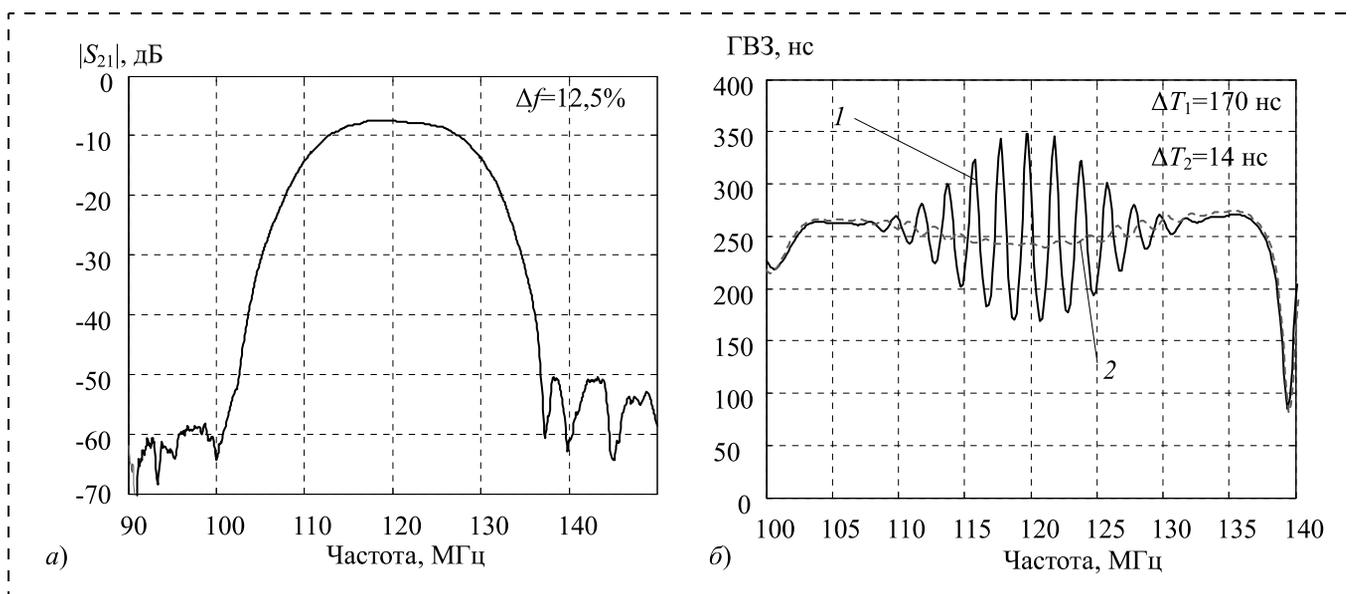
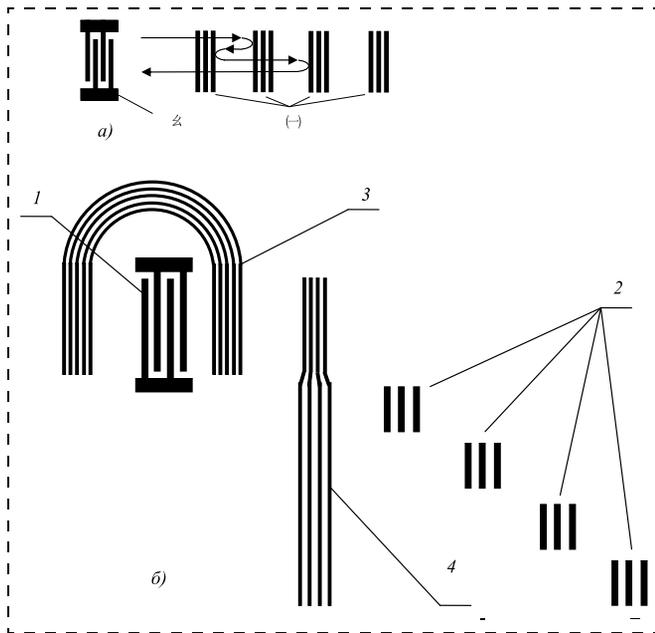


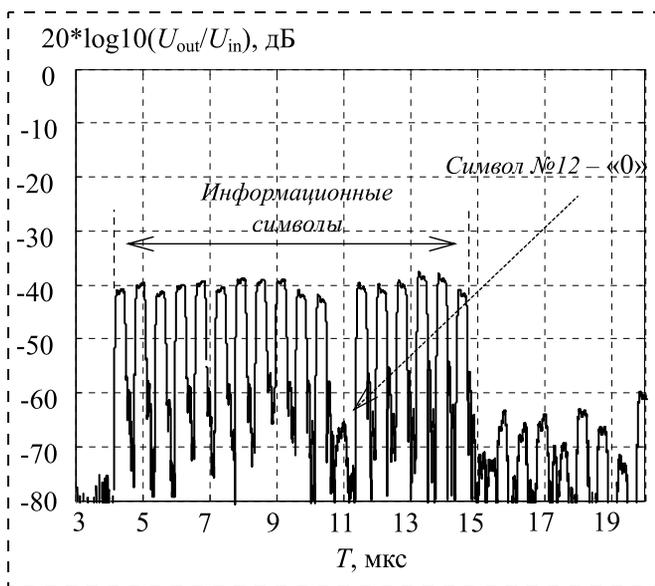
Рис. 4. Характеристики фильтра А446-120:

а — АЧХ; б — ГВЗ (1 — традиционное исполнение трансверсального фильтра, 2 — новое архитектурно-топологическое решение)

позволяет работать с ОС с большим коэффициентом отражения и получить динамический диапазон не менее 23...25 дБ по ложным сигналам. Новая конструкция за счет применения ответвителя минимизирует все акустические отражения и перерождения, присущие "классической" схеме многоканальной метки, и способна работать на любых временных задержках без опасности влияния ложных сигналов.



**Рис. 5. Конструкции традиционной (а) и новой многоканальной ПАВ-радиометки (б):**  
 1 — входной ВШП; 2 — отражатели; 3 — U-образный многополосковый ответвитель с равным делением энергии; 4 — многополосковый ответвитель (компрессор)



**Рис. 6. Импульсный отклик экспериментального образца радиометки на ПАВ. Информационный символ № 12 — "0" при АМ-кодировании**

#### 4. Развитие методов расчета

После того, как на этапе структурного синтеза удалось предварительно выбрать конструктивно-топологическое решение, необходимо решить задачу анализа — расчет рабочих характеристик, например, комплексного коэффициента передачи. Для реализации этого требуются:

- адекватная модель или метод проектирования;
- необходимые параметры материалов для выбранной модели расчета.

В процессе разработки устройств необходимым этапом является моделирование и предварительный расчет характеристик, для которого требуется знание параметров акустических волн в электродных структурах. Преимущества использования компьютерных пакетов моделирования состоят в сокращении времени и затрат на разработку, возможностях оптимизации топологии и конструктивного исполнения устройства, а также в лучшем понимании физических процессов, лежащих в основе работы таких устройств. К настоящему времени разработано несколько моделей [12—15] и подходов к моделированию устройств на ПАВ — от простейшей модели дельта-функций до полного 3D-моделирования устройства. У каждой модели на основе ее преимуществ и недостатков есть свои ограничения и целесообразность применения для разрабатываемого устройства. Часто разработчики используют на разных этапах проектирования различные модели и подходы в целях получения как необходимой точности расчетов, адаптивности модели, так и приемлемых временных и вычислительных ресурсов.

Два основных подхода, которые используют разработчики для проектирования и расчета рабочих характеристик представлены на рис. 7.

Первый подход — численный расчет с использованием метода конечных элементов (МКЭ). При этом существует возможность расчета устройства целиком в 3D-размерности, для чего необходимо создать объемную модель и задать необходимые константы материала. Но следует понимать, что учет множества параметров при 3D-моделировании реальных полнопертурных устройств приводит к резкому росту требований к вычислительным ресурсам и увеличению времени анализа.

Второй подход — аналитический, который включает в себя *COM*-модель (модель связанных мод — *coupling of mode*) и ее формализацию на базе *P*-матриц [12, 13]. *COM*-модель требует небольшое число ключевых *COM*-параметров, которые предварительно анализируют на простых ячейках с помощью численных методов. Данный подход требует сравнительно небольшого времени вычисления, что позволяет проводить синтез и оптимизацию параметров топологии устройства на ПАВ. Неко-

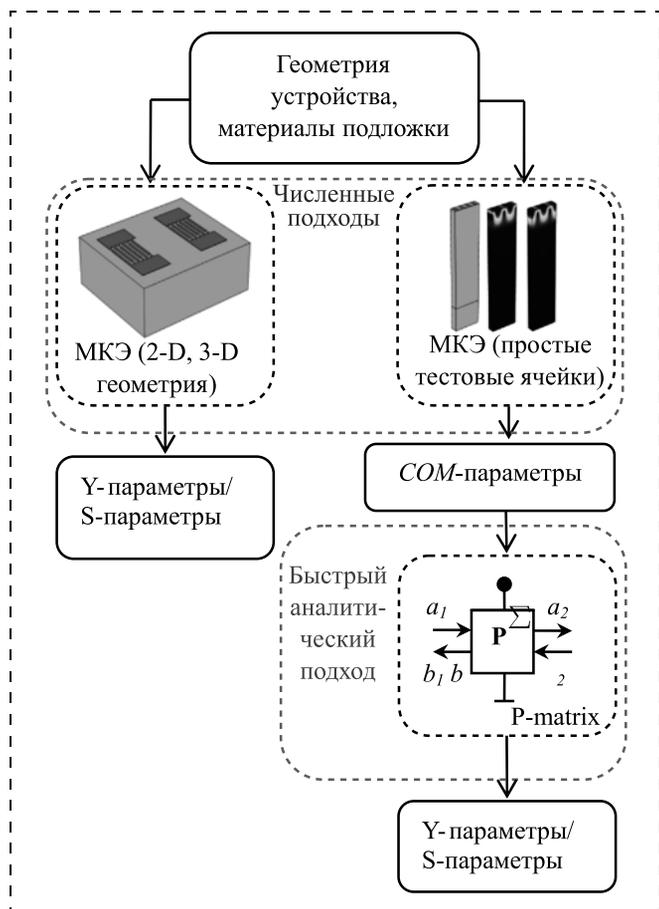


Рис. 7. Современные подходы к проектированию и расчету устройств на ПАВ

торые ключевые параметры можно взять из уже имеющихся литературных источников, однако всегда следует учитывать, что эти данные получены из конкретного набора упругих, электрических и пьезоэлектрических констант и существуют для ограниченного числа используемых материалов подложек. В практике разработки устройств на ПАВ необходимы следующие ключевые параметры:

- скорость ПАВ на свободной и металлизированной поверхности;
- скорость ПАВ под элементами ВШП и ОС;
- коэффициент отражения ПАВ от электрода;
- коэффициент прохождения ПАВ через электрод;
- коэффициент акустоэлектронного преобразования;
- затухание ПАВ в подложке (в том числе, и с учетом потерь за счет генерации объемных волн);
- статическая емкость электрода;
- фазовый сдвиг между центром отражения и возбуждения ПАВ.

Причем при определении этих параметров приходится учитывать довольно большое число степеней свободы, относящихся к топологическим, конструктивным и технологическим особенностям устройств. Это такие факторы, как:

- геометрия элементарной ячейки ВШП;
- профиль электрода;
- тип электродной ОС (закороченная или электрически разомкнутая);
- тип элементарного отражателя в ОС (электрод или канавка);
- геометрия шин ВШП и контактных площадок;
- коэффициент металлизации электродных структур;
- толщина металлизации.

Все перечисленные ключевые параметры можно моделировать и анализировать в современных пакетах, таких как COMSOL и ANSYS [16–19].

Результаты численного анализа ключевых параметров акустических волн, модель связанных мод и матричный подход к формализации вычислений предоставляют разработчику быстрый, эффективный и легко адаптируемый к изменениям топологии инструмент для расчета характеристик акустоэлектронных устройств. Пример успешной реализации данного подхода представлен в работе [20], в которой рассмотрены лестничные фильтры на вытекающих ПАВ на подложке сильного пьезоэлектрического материала  $49^\circ Y-X \text{ LiNbO}_3$ . Данный подход приводит к увеличению точности расчета, снижению трудоемкости, уменьшению времени расчета и числа итераций при разработке. Использование быстрых аналитических методов, таких как модель связанных мод, помогает снизить требования к ресурсам и мощностям компьютера по сравнению с численными методами на основе МКЭ. Точность расчета в свою очередь помогает минимизировать число экспериментальных итераций, что приводит к повышению эффективности и снижению затрат при разработке и сокращает время выхода рабочего прибора на рынок.

## Заключение

Успешное решение задачи по созданию микроприборов на ПАВ с предельно достижимыми и критическими электрическими параметрами возможно только на основе сопряжения разработки конструктивно-технологических, материаловедческих, физических и схемотехнических принципов построения. Представленные примеры реализаций устройств с предельно достижимыми параметрами показали, что при правильном структурном синтезе и соответствующем моделировании с применением как оригинальных программ и методик, так и с использованием современных пакетов можно прогнозировать и получать экспериментально соответствующие мировому уровню образцы микроприборов на ПАВ. Достижение предельно возможных и критических параметров позволяет конкурировать на рынке с техническими решениями на других технологиях.

Автор выражает благодарность В. Р. Реуту — Генеральному директору — генеральному конструктору ООО "АЭК Дизайн" за ценные творческие советы и предоставление экспериментальных данных.

### Список литературы

1. Бальшева О. Л., Григорьевский В. И., Гуляев Ю. В., Дмитриев В. Ф., Мансфельд Г. Д. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования: монография / Под ред. академика РАН Ю. В. Гуляева. М.: Радиотехника, 2012. 576 с.
2. Аристархов Г. М., Гуляев Ю. В., Дмитриев В. Ф., Зайченко К. В., Комаров В. В. и др. Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства. М.: Радиотехника. 2020. 504 с.
3. Багдасарян А. С., Гуляев Ю. В., Доберштейн С. А., Сеницына Т. В. Фильтры на ПАВ с малыми потерями — одно из главных конкурентных преимуществ техники ПАВ // Техника радиосвязи. 2019. № 3 (42). С. 86—98.
4. Гуляев Ю. В. Акустоэлектроника (исторический обзор) // Успехи физических наук. 2005. Т. 175, № 8. С. 887—895.
5. Nakanishi H., Nakamura H., Tsurunari T., Fujiwara J. Good Temperature Coefficient of Frequency SAW resonator on a SiO<sub>2</sub>/Al/LiNbO<sub>3</sub> Structure // IEEE Int. IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. 2010. P. 1298—1301.
6. Takai T. et al. I. H.P. SAW Technology and its Application to Microacoustic Components (Invited) // Proc. 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). 6—9 Sept. 2017. P. 1—8. DOI: 10.1109/ULTSYM.2017.8091876.
7. Сеницына Т. В., Дорофеева С. С., Гарифулина А. Т., Груднев А. С. Техника поверхностных акустических волн: итоги и перспективы // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции, 6—8 октября 2021 года, Омск, Россия. Омск: ОНИИП, 2021. С. 23—25.
8. Багдасарян А. С., Сеницына Т. В. Фильтры на ПАВ, выдерживающие входную мощность радиосигнала 1—2 Вт, для телекоммуникационной аппаратуры // Техника радиосвязи. 2016. № 3 (30). С. 80—89.

9. Морозов А. И., Проклов В. В., Станковский Б. А. Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств. М.: Радио и связь. 1981. 184 с.
10. Campbell C. K. Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communication. Boston: Academic Press, 1998. 631 p.
11. Реут В. Р., Койгеров А. С., Андрейчев С. С., Дорохов С. П., Салов А. С. Новая конструкция многоканальной ПАВ-радиометки на основе многополоскового ответвителя // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 10. С. 579—593. DOI: 10.17587/nmst.21.579-593.
12. Дмитриев В. Ф. Вывод модифицированных уравнений связанных поверхностных акустических волн // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 9. С. 1134—1143.
13. Plessky V. P., Koskela J. Coupling-of-modes analysis of SAW devices // Int. J. High Speed El. and Syst. Dec. 2000. Vol. 10, N. 4, pp. 867—947.
14. Hashimoto K. Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications: modeling and simulation. N. Y.: Springer, 2000. 321 p.
15. Morgan D. Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing. Academic Press. 2010. 448 p.
16. Yantchev V., Turner P., Plessky V. COMSOL modeling of SAW resonators // IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. 2016. P. 1—4. DOI: 10.1109/ULTSYM.2016.7728546
17. Tikka A., Al-Sarawi S., Abbott D. Acoustic Wave Parameter Extraction with Application to Delay Line Modelling Using Finite Element Analysis // Sensors & Transducers Journal. August 2008. Vol. 95. Is. 8. P. 26—39.
18. Koigerov A. S., Balysheva O. L. Numerical Approach for Extraction COM Surface Acoustic Wave Parameters from Periodic Structures Analysis // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). P. 1—6. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470638
19. Койгеров А. С., Бальшева О. Л. Численный анализ параметров псевдоповерхностных акустических волн в кристаллах ниобата лития и танталата лития // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66, № 12. С. 1224—1232.
20. Койгеров А. С. Лестничные фильтры на вытекающих поверхностных акустических волнах на подложке ниобата лития. // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23, № 3. С. 139—147. DOI: 10.17587/nmst.23.139-147.

**A. S. Koigerov**, Ph. D., Tech., Associate Professor at the Department of micro- and nano electronics, a.koigerov@gmail.com, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197376, St. Petersburg, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Koigerov Aleksey S.**, Ph. D., Tech., Associate Professor at the Department of micro- and nano electronics, e-mail: a.koigerov@gmail.com, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation.

## Achievement of Critical and Limiting Parameters in Surface Acoustic Wave Microdevices

*Received on December 13, 2021*

*Accepted on February 01, 2022*

*Currently, acoustoelectronics devices (filters, delay lines, resonators, etc.) are used in various radio engineering systems. In addition, they are used in microsystem technology as the basis for microminiature sensors for various purposes — sensors of physical quantities (temperature, micro-displacement, acceleration, etc.). In the range from tens of megahertz to 2.5 GHz, surface acoustic wave micro-devices have become widespread. The field of technical applications of SAW micro-devices is rapidly developing. In order to withstand competition from other technologies, it is clear that it requires not only the improvement of common*

topological solutions, but also the development and research of new designs of SAW micro-devices capable of reaching limiting and critical parameters. It is also necessary to use modern methods and approaches to device modeling. **Purpose:** to review and analyze the problems of the current state of SAW devices from the point of view of achieving limit parameters. **Results:** It is shown that the stages of structural and parametric synthesis of topology are key aspects in the design of devices with limiting parameters. Some results of research and development of surface acoustic waves devices based obtained in the field of creating ultra-narrowband filters, ultra-wideband delay lines and unique radio tags based on a multi-band coupler are presented. A filter with minimal unevenness of the group delay time for a class of transversal filters is presented. It is shown that obtaining devices with limiting and critical parameters is possible only on the basis of interfacing the development of structural and technological, materials science, physical and circuit design principles. Modern approaches to analyzing the output characteristics of surface acoustic wave devices and wave processes in piezoelectric substrates are described.

**Keywords:** surface acoustic waves, resonator, SAW filters, method coupled of mode, finite element method, wideband filter, niobate lithium, piezsubstrate

For citation:

**Koigerov A. S.** Achievement of Critical and Limiting Parameters in Surface Acoustic Wave Microdevices. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 199–207.

DOI: 10.17587/nmst.24.199-207

## References

1. **Balysheva O. L., Grigor'evskij V. I., Gulyev Yu. V., Dmitriev V. F., Mansfel'd G. D.** Akustoelektronnye ustrojstva obrabotki i generacii signalov. Princi py raboty, rascheta i proektirovaniya/ Ed. akad. RAN Yu. V. Gulyev. Moscow, Radiotekhnika, 2012. 576 p. (in Russian).
2. **Aristarkhov G. M., Gulyaev Yu. V., Dmitriev V. F.** et al. Filtration and spectral analysis of radio signals. Algorithms, structures, devices. M.: Radiotekhnika. 2020. 504 p. (in Russian).
3. **Bagdasaryan A. S., Gulyaev Yu. V., Dobershtein S. A., Sinitina T. V.** Low-loss SAW filters — one of major competitive advantages of SAW technology // *Radio Communication Technology*, 2019, no. 3 (42), pp. 86–98 (in Russian).
4. **Gulyaev Yu. V.** Acoustoelectronics (historical review), *Physics-Uspokhi*, 2005, vol. 48, no. 8, pp. 847–855 (in Russian).
5. **Nakanishi H., Nakamura H., Tsurunari T., Fujiwara J.** Good Temperature Coefficient of Frequency SAW resonator on a SiO<sub>2</sub>/Al/LiNbO<sub>3</sub> Structure, *IEEE Int. IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 2010, pp. 1298–1301.
6. **Takai T.** et al. I.H.P. SAW Technology and its Application to Microacoustic Components (Invited), *Proc. 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 6–9 Sept. 2017, pp. 1–8. DOI: 10.1109/ULTSYM.2017.8091876.
7. **Sinitina T. V., Dorofeeva S. S., Garifulina A. T., Gruzdev A. S.** Surface acoustic wave technology: the result and prospects // *Radiotekhnika, elektronika i svyaz': tezisy dokladov VI mezhdunarodnoi ntk.* (6–8 october 2021, Omsk, Russia). pp. 23–25. (in Russian).
8. **Bagdasaryan A. S.** SAW filters withstanding RF signal input power 1–2 W for telecommunication equipment, *Radio Communication Technology*, 2016, no. 3 (30), pp. 80–89 (in Russian).
9. **Morozov A. I., Proklov V. V., Stankovskii B. A.** P'yezoelektricheskiye preobrazovateli dlya radioelektronnykh ustroystv, Moscow, Radio i svyaz', 1981, 184 p. (in Russian).
10. **Campbell C. K.** Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communication, Boston, Academic Press, 1998, 631 p.
11. **Reut V. R., Koigerov A. S., Andreychev S. S., Dorokhov S. P., Salov A. S.** The New Design of SAW ID Tags on Base of Multistrip Coupler, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 10, pp. 579–593. DOI: 10.17587/nmst.21.579-593.
12. **Dmitriev V. F.** Modified equations of coupled surface acoustic waves, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, vol. 54, no. 9, pp. 1077–1086.
13. **Plessky V. P., Koskela J.** Coupling-of-modes analysis of SAW devices, *Int. J. High Speed El. and Syst. Dec.*, 2000, vol. 10, no. 4, pp. 867–947.
14. **Hashimoto K.** Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications: modelling and simulation. N. Y., Springer. 2000. 321 p.
15. **Morgan D.** Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing. Academic Press, 2010, 448 p.
16. **Yantchev V., Turner P., Plessky V.** COMSOL modeling of SAW resonators, *IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ULTSYM.2016.7728546
17. **Tikka A., Al-Sarawi S., Abbott D.** Acoustic Wave Parameter Extraction with Application to Delay Line Modelling Using Finite Element Analysis, *Sensors & Transducers Journal*, 2008, vol. 95, is. 8, pp. 26–39.
18. **Koigerov A. S., Balysheva O. L.** Numerical Approach for Extraction COM Surface Acoustic Wave Parameters from Periodic Structures Analysis, *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, pp. 1–6, doi: 10.1109/WECONF51603.2021.9470638.
19. **Koigerov A. S., Balysheva O. L.** Numerical Analysis of Parameters of Pseudosurface Acoustic Waves in Lithium Niobate and Tantalate Crystals, *Radiotekhnika i elektronika*, 2021, vol. 66, no. 12, pp. 1224–1232 (in Russian).
20. **Koigerov A. S.** Ladder type of leaky surface acoustic wave filters on substrate of lithium niobate, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 139–147. doi: 10.17587//nmst.23.139-147 (in Russian).

**Т. М. Зимина**, канд. физ.-мат. наук e-mail: tmzimina@gmail.com, **А. В. Пудова**, инженер, **И. В. Мандрик**, мл. науч. сотр., **А. О. Гатауллин**, студент  
ИЦ ЦМИД, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург

## БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ЦИАНОБАКТЕРИЙ

Поступила в редакцию 25.01.2022

*Представлена реализация биоэлектрических источников энергии на основе цианобактерий с использованием биосовместимых углеродных электродов. Рассмотрен принцип действия биоэлектрических источников энергии. На основании анализа электрогенных характеристик различных штаммов цианобактерий выбрана культура *Synechococcus*. Проведены экспериментальные исследования по поиску углеродных материалов, способных выполнять роль электродов в биоэлектрической ячейке. Разработана конструкция однокамерной ячейки с протообменной мембраной и проведен анализ мощностных характеристик.*

**Ключевые слова:** биоэнергетика, цианобактерии, электроды, углерод, биоэнергетическая ячейка

### Введение

В настоящее время проявляется повышенный интерес к использованию живых микроорганизмов для получения энергии и создания устройств биоэлектроники. Длительное время в центре внимания были устройства на основе гетеротрофных бактерий, преобразующие органические углеродсодержащие соединения в электроэнергию, называемые микробными топливными элементами (МТЭ) [1]. МТЭ — это биотехнологические устройства, способные вырабатывать электрическую энергию в процессе преобразования органических веществ посредством микроорганизмов. Фотоавтотрофные цианобактерии и одноклеточные водоросли используют для изготовления биоэлектрических источников энергии на основе цианобактерий (БИЭЦ) [2, 3], работающих без дополнительных углеродных питательных веществ. Электроны могут возникать в процессе кислородного фотосинтеза под действием света или в процессе окисления углеводов и других углеродосодержащих соединений, синтезированных из диоксида углерода, находясь даже в темноте [3]. Таким образом БИЭЦ могут обеспечивать энергией как при свете, так и в темноте, в отличие от фотоэлектрических (ФЭ)

систем [3]. Также БИЭЦ способны к восстановлению повреждения фотосинтетического аппарата, вызванного светом, в отличие от ФЭ систем, содержащих изолированные центры фотосинтетических реакций [4], и поэтому они более долговечны [5]. Эти особенности позволяют сделать вывод о возможности применения БИЭЦ в качестве биосовместимых источников питания в устройствах с низким энергопотреблением.

В данной работе представлена разработка БИЭЦ на основе цианобактерии *Synechococcus* и ее фотосинтетического аппарата для преобразования солнечной энергии в электрическую посредством фотолиза воды. Основными направлениями исследования разрабатываемых БИЭЦ выбраны миниатюризация и повышение длительности срока эксплуатации.

### Физико-химические и биологические основы электрических батарей на основе цианобактерий

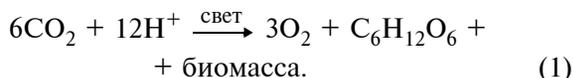
#### Схема работы БИЭЦ

Преобразование солнечной энергии в электрическую с использованием БИЭЦ является важным этапом развития в области возобновляемых источников энергии. Цианобактерии можно использо-

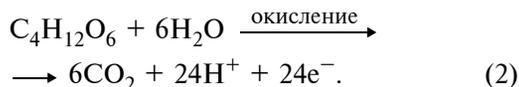
вать в качестве катода для генерации кислорода или в качестве анода, как донора электронов. Схема работы БИЭЦ аналогична МТЭ в необходимости наличия системы из анода и катода для осуществления окислительно-восстановительных реакций, от которых зависит общая активность устройства [6]. На аноде процесс окисления происходит посредством микробиологического разложения или фотосинтеза, с перемещением генерируемых электронов прямо или косвенно на электрод анода. На катоде реакция восстановления протекает с использованием кислорода в качестве акцептора электронов.

В случае классической однокамерной ячейки с протонообменной мембраной между ними в анодной камере находится органическая среда с микроорганизмами. Помимо самих бактерий, в анодной камере также могут находиться вода, глюкоза, различные вещества-посредники, благодаря которым происходит перенос электронов от микроорганизмов к электроду (аноду) [7]. В данной конструкции катод находится вне питательной среды, подвергаясь воздействию воздуха для получения из атмосферы кислорода, применяемого в качестве акцептора электронов. Схема такого БИЭЦ представлена на рис. 1 (см. третью сторону обложки).

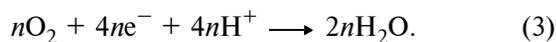
Цианобактерии в анодной камере при фотосинтетическом процессе под действием света создают электроны и протоны в зависимости от количества поглощенного углекислого газа и света:



В качестве конечных продуктов реакции образуются органические вещества, кислород и биомасса цианобактерий. При темновом дыхании цианобактерий кислород, выделяемый в процессе фотосинтеза, поглощается цианобактериями для разложения органических веществ и образования электронов и протонов в отсутствие света:



Создаваемые электроны перемещаются к катоду через цепь нагрузки вследствие возникшей разности потенциалов между восстановительной средой в анаэробной анодной камере и окислительной средой в катоде. Протоны двигаются к катоду через протообменную мембрану. Далее электроны и протоны поглощаются в катодной камере и в процессе реакции окисления образуют воду:



Несмотря на множество электрохимических и биологических параметров на производительность БИЭЦ влияют следующие факторы [8]:

- пополнение и поглощение кислорода на катоде;
- окисление электрода в анодной камере;
- перенос электронов из анодной камеры к поверхности электрода;
- проницаемость протообменной мембраны.

Реакция окисления на катоде определяется поверхностью электрода, его каталитическими свойствами, однородностью катодной камеры и концентрацией акцептора электронов в объеме жидкости в топливном элементе. В качестве акцептора электронов в БИЭЦ обычно используют кислород. Принято считать, что низкая кулоновская эффективность БИЭЦ связана с ограничением кислорода в катодной камере и диффузией кислорода в анодную камеру через протообменную мембрану [9].

### Цианобактерии *Synechococcus*

Как базис микробных топливных элементов цианобактерии играют ключевую роль в окружающей среде и обладают огромным потенциалом в качестве платформы для возобновляемого производства продуктов питания, энергии, химикатов и биотоплива [10–13].

Чаще всего цианобактерии можно встретить в стоячих пресных водоемах и морях, но некоторые культуры этих бактерий, как например, *Pleurococcus*, *Chlorella*, *Desmococcus*, *Synechococcus*, *Nostoc* и другие встречаются даже на суше [14]. Некоторые культуры цианобактерий представлены на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки).

Благодаря сочетанию разнообразия видов, их распространенностью, возможностью генной модификации и эффективностью использования, применения цианобактерий в качестве электрогенных микроорганизмов получило широкое распространение за последние 10 лет. К тому же они в настоящее время являются наиболее широко применяемыми микроорганизмами в фотосинтезирующих микробных топливных элементах [15–17]. В табл. 1 приведены некоторые сравнительные характеристики фотосинтезирующих элементов, использующих цианобактерии.

На сегодняшний день нет однозначного ответа на вопросы, какими внутренними механизмами обусловлено появление электронов внутри бактерии, и как потом эти электроны попадают на электрод. Однако результаты некоторых авторов [18–22] были получены без использования каких-либо молекул-посредников для передачи электронов от внешней мембраны бактерии электроду, что подтверждает их способность к прямому транспорту.

Наблюдение за светозависимым производством тока фототрофами в БИЭЦ привело к гипотезе о том, что эти электроны возникают не в результате

Таблица 1

**Характеристики БИЭЦ с использованием различных штаммов цианобактерий**

Штамм	Материал анода	Максимальная мощность, мВт/м <sup>2</sup>	Источник
<i>Synechococcus sp. PCC 6803</i>	Оксид индия—олова/Полиэтилентерефталат	10	19
<i>Calothrix</i>	Полипиррол/углеродная ткань	6	20
<i>Nostoc</i>	Полипиррол/углеродная ткань	1,2	20
<i>Pseudoabaena limnetica</i>	Нержавеющая сталь	$1,2 \cdot 10^{-7}$	21
<i>Synechocystis</i>	Нанопористый оксид индия—олова/Оксид фтора—олова	3,770	22
<i>Synechocystis</i>	Оксид индия—олова/Оксид фтора—олова	0,630	23

биохимического окисления органических соединений, а скорее в результате расщепления воды под действием света.

**Конструктивно-технологические основы изготовления БИЭЦ**

Поскольку МТЭ имеют общий механизм работы с обычными водородно-кислородными топливными элементами, их конструкции во многом совпадают. Существуют однокамерные, двухкамерные, мембранные, безмембранные конструкции [23]. Ячейки, работающие без фотосинтезирующих микроорганизмов, обычно имеют две камеры, разделенные мембраной, способной проводить ионы. Мембрана также служит барьером для кислорода и микробов. Недостатком использования мембраны можно назвать ее высокую стоимость и повышение внутреннего сопротивления ячейки.

Применение фотосинтезирующих бактерий влечет за собой необходимость обеспечить этим бактериям доступ к солнечному свету, поэтому такие ячейки должны иметь прозрачные элементы в конструкции [24—31]. Многочисленные исследования микробных топливных элементов показали, что использование так называемого воздушного катода представляется наиболее эффективным, дешевым и простым способом обеспечить катод кислородом для последующего восстановления последнего до воды.

Для сравнительного анализа различных обработок и конструкций электродов была собрана следующая конструкция, показанная на рис. 3. Такая ячейка обеспечивает одновременно доступ света к микроорганизмам и воздуха к катоду. Объем ре-

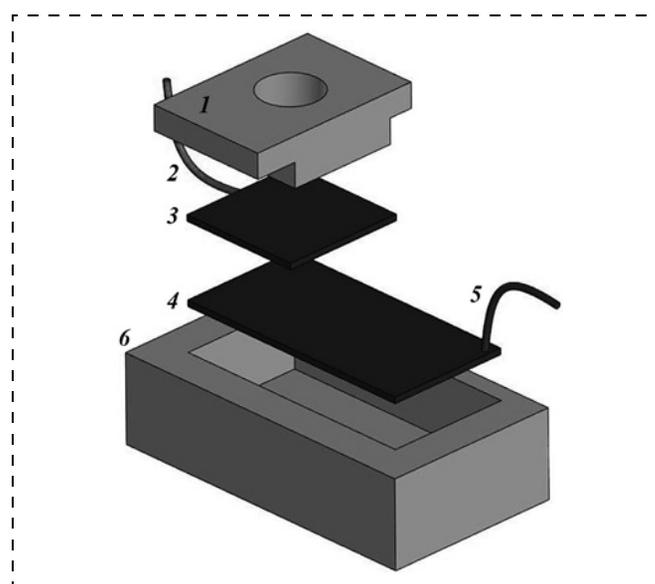
зервуара равен 1 см<sup>3</sup>, анод и катод имеют размеры 2 × 1 и 0,9 × 0,9 см соответственно. Таким образом, площадь этих электродов составляет для анода и катода 2 и 0,81 см<sup>2</sup> соответственно. Корпус ячейки напечатан на 3D-принтере Flying Bear Ghost 5 из полилактида. Провода для подключения нагрузки и измерительных приборов прикреплены к электродам с помощью электропроводящего композита. Такая конструкция является очень простой в сборке и имеет низкое внутреннее сопротивление вследствие отсутствия мембраны и в связи с этим свободное движение протонов. К недостаткам такой конструкции можно отнести тот факт, что доступ к свету имеет лишь часть поверхности анода.

Электроды, выполняющие роль анода и катода, в первую очередь должны удовлетворять следующим требованиям:

- иметь развитую поверхность для большей площади контакта с бактериями (анод);
- низкое электрическое сопротивление для уменьшения внутреннего сопротивления ячейки;
- быть биосовместимыми, чтобы исключить какой-либо вред бактериям;
- иметь коррозионную устойчивость для обеспечения долговременной работы элемента;
- иметь по возможности низкую стоимость, что позволит составить реальную конкуренцию существующим источникам.

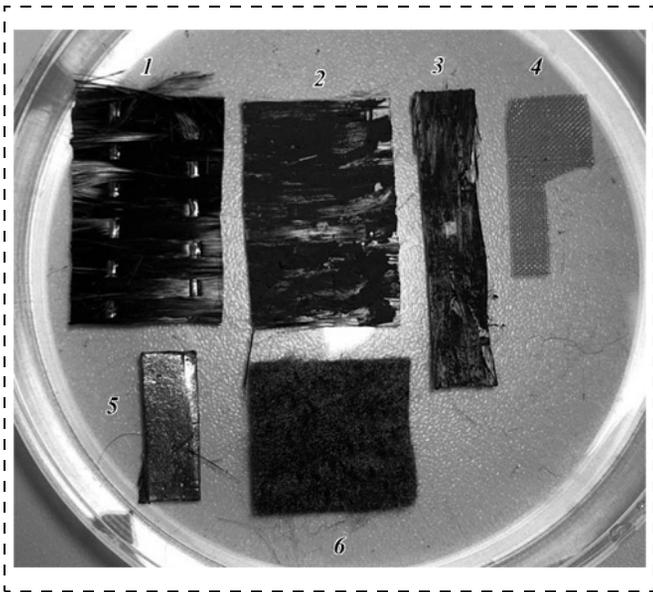
Таким образом, в качестве исследуемых материалов в рамках данной работы, были выбраны различные углеродные материалы, а также сетка из нержавеющей стали.

Что касается катода, то ввиду довольно медленной скорости реакции восстановления кислорода



**Рис. 3. Макет БИЭЦ;**

1 — крышка катода со сквозным отверстием; 2 — провод катода; 3 — катод; 4 — анод; 5 — провод анода; 6 — резервуар



**Рис. 4. Исследуемые материалы и их обработка:**

1 — углеродное волокно; 2 — углеродное волокно, покрытое электропроводящим композитом; 3 — углеродное волокно, покрытое электропроводящим композитом и активированным углем; 4 — сетка из нержавеющей стали; 5 — углерод; 6 — углеродный войлок

необходимо использовать какой-либо катализатор. В подавляющем большинстве работ описано применение платины, однако ее использование очень сильно повышает стоимость такого БИЭЦ. В качестве альтернативы дорогому металлу можно применять углеродсодержащие материалы, например активированный уголь. Поэтому необходимо изготовить комбинированный электрод, состоящий из подложки и нанесенных на нее частиц, содержащих углерод.

В данной работе были исследованы материалы, которые не подвержены коррозии и могут без вреда контактировать с микроорганизмами. Образцы этих материалов представлены на рис. 4.

Следующая исследованная комбинация электродов представляет собой анод из углеродсодержащего волокна с нанесенным электропроводящим композитом и такой же катод. Полученный таким образом материал показал хорошую адгезионную способность. На рис. 5 (см. четвертую сторону обложки) представлены фотографии анода до и после проведения экспериментов с этой ячейкой.

Углеродное волокно состоит из тонких нитей углерода, образованных микроскопическими кристаллами. Отдельные нити этого материала являются очень гладкими, в связи с чем возможно слабое крепление бактерий к такому электроду. По этой причине углеродное волокно было покрыто электропроводящим композитом для создания шероховатой поверхности и придания дополнительной жесткости. Электропроводящий композит состо-

ит из углеродного электропроводящего композита, эластомера и полиметилметакрилата. Электрод, представляющий собой углеродное волокно, покрытое смесью углеродного электропроводящего композита и активированного угля, был использован в качестве катода.

Углеродный электропроводящий композит на основе стеклоуглерода разработан и запатентован в СПбГЭТУ "ЛЭТИ" (патент РФ № 2265918).

Сетка из нержавеющей стали с размером ячеек  $0,7 \times 0,7$  мм была использована в качестве анода и токосъемника для комбинированного катода.

Углеродный войлок является пористым материалом, состоящим из множества тонких волокон диаметром около 20 мкм. Такой материал имеет очень развитую поверхность, но является гидрофобным, что исключает его применение в роли анода. Однако углеродный войлок был использован для изготовления комбинированного катода с применением активированного угля и политетрафторэтилена (ПТФЭ). Для этого порошок ПТФЭ с диаметром частиц 20 мкм был смешан с измельченным активированным углем в соотношении 5:1. Далее к сухой смеси был добавлен этанол для растворения ПТФЭ. При постоянном помешивании в ультразвуковой ванне этот раствор был доведен до пастообразного состояния, после чего полученная паста была впрессована в войлок. Сушку полученного композитного материала проводили в печи при температуре  $90^\circ\text{C}$  в течение 15 мин.

Эксперименты показали, что углерод очень быстро разбухает в воде и становится непригоден для дальнейшего использования в качестве электродов БИЭЦ.

Таким образом, анодом для экспериментов было выбрано углеродсодержащее волокно с электропроводящим композитом, а в качестве катода была использована сетка из нержавеющей стали с закрепленным на ней с помощью электропроводящего композита комбинированным катодом (КК). Эта ячейка изображена на рис. 6 (см. четвертую сторону обложки).

В данной работе использованы цианобактерии штамма *Synechococcus*, выращенные в ресурсном центре "Культивирование микроорганизмов" СПбГУ. Выращивают и содержат микроорганизмы в так называемой среде № 6, состав которой представлен ниже

Вещество	Содержание
$\text{NaHCO}_3$ . . . . .	0,2 г/л
$\text{CaCl}_2$ . . . . .	0,15 г/л
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . . . . .	0,2 г/л
$\text{K}_2\text{HPO}_4$ . . . . .	0,2 г/л
$\text{KNO}_3$ . . . . .	1 г/л
Раствор микроэлементов . . . . .	1 мл/л

## Исследование характеристик БИЭЦ

Изменение напряжения ячейки, в которой были использованы углеткань с нанесенным электропроводящим композитом в качестве анода и катода, в процессе длительного освещения представлено на рис. 7. Из этого графика видно, что максимальное значение напряжения после стабилизации во время световой фазы составляет 10 мВ, а минимальное во время темновой фазы — 8 мВ.

На рис. 8 показано выходное напряжение ячейки с анодом из нержавеющей стали и комбинированным катодом. К данной ячейке через 1,5 ч был подключен резистор на 250 кОм. На рис. 9 показано напряжение на подключенном резисторе. Согласно этому графику максимальное напряжение на резисторе составило 0,3 мВ.

Следующие характеристики были получены для ячейки, состоящей из углеродсодержащего волокна с электропроводящим композитом и комбинированным катодом. К ней был подключен резистор на 250 кОм. Каждые 2 ч свет выключали и включали для наблюдения светозависимости выходной мощности. Результаты эксперимента представлены на рис. 10. Из него видно, что максимальное напряжение на нагрузке составило более 165 мВ.

## Анализ мощностей БИЭЦ с различными анодами

Все результаты измерений характеристик ячеек сведены в табл. 2 из которой следует, что ячейки с нержавеющей сталью имеют довольно низкую выходную мощность. Скорее всего, это вызвано тем, что гладкая поверхность обработанной стали не позволяет "закрепиться" бактериям. Ячейки на основе углеродных материалов с более развитой поверхностью и в сочетании с высокой проводимостью имеют лучшие электрические характеристики (табл. 2).



Рис. 7. Напряжение ячейки с анодом из углеродсодержащего волокна в зависимости от динамики освещения

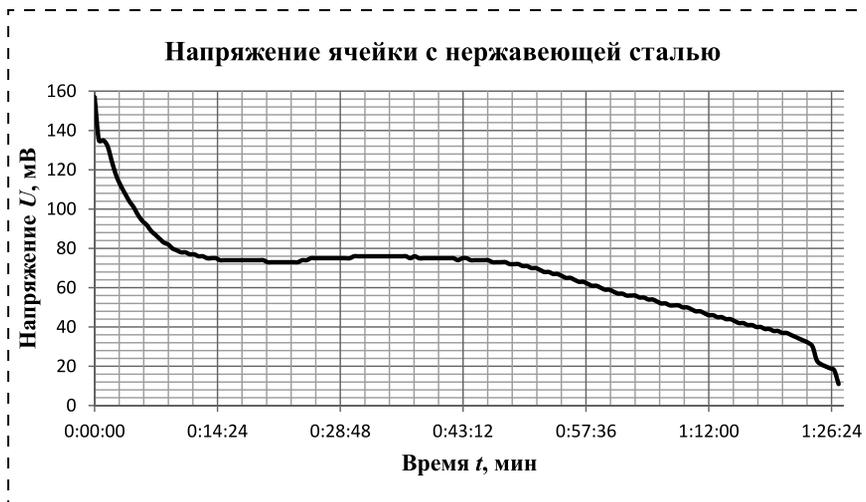


Рис. 8. Напряжение ячейки с анодом из нержавеющей стали



Рис. 9. Напряжение на резисторе, подключенном к ячейке из нержавеющей стали

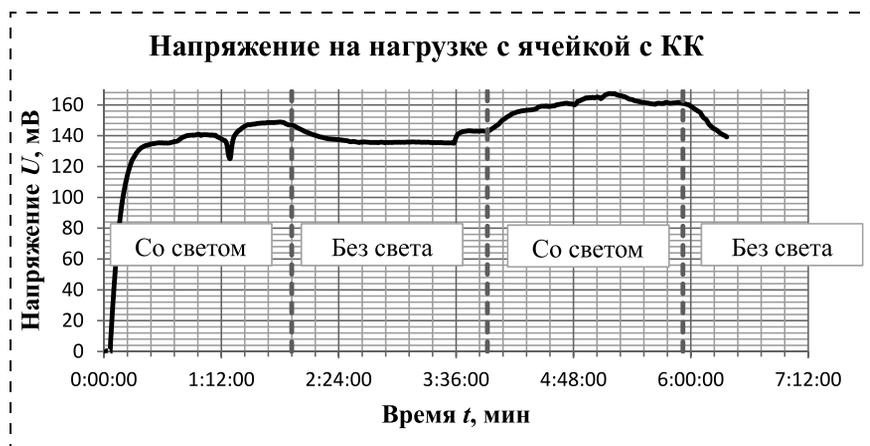


Рис. 10. Напряжение на резисторе, подключенном к ячейке с комбинированным катодом

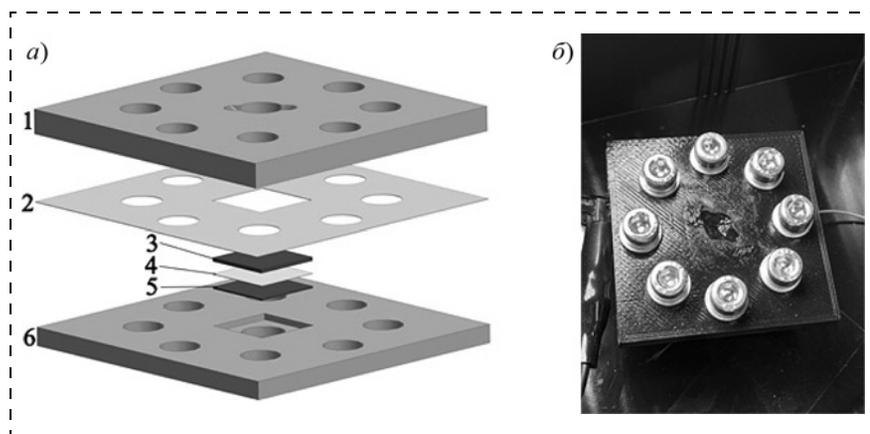


Рис. 11. Ячейка БИЭЦ с протообменной мембраной: а — структура ячейки (1 — крышка с резервуаром; 2 — прокладка; 3 — анод; 4 — мембрана; 5 — катод; 6 — подставка); б — собранная ячейка

### Ячейка БИЭЦ с протообменной мембраной

Для улучшения электрических характеристик была собрана новая ячейка с протообменной мембраной (рис. 11). Отличительная особенность ячейки — полная освещенность анода, что позволяет всем бактериям получить достаточное количество солнечной энергии. Однако необходимость использовать мембрану делает эту ячейку дороже остальных. В качестве мембраны можно использовать протообменную мембрану МФ-4СК. Она является аналогом полимерной электролитической мембраны "Нафцион", выпускаемой фирмой Dupont и произведена НПО ОАО "Пластполимер". Мембрана имеет следующие характеристики: толщина —  $120 \pm 15$  мкм (в сухом виде); обменная емкость — 0,93 мг-экв/г. Площадь анода ячейки — 0,38 см<sup>2</sup>.

Усовершенствованная конструкция БИЭЦ с протообменной мембраной, катодом и анодом на основе углеродного волокна и комбинированным катодом, соответственно, повысила электрические характеристики БИЭЦ с одновременным уменьшением площади ячейки (табл. 3). Удель-

Таблица 2

#### Сравнительные характеристики ячеек с различным материалом анода

Анод/катод	Площадь анода, см <sup>2</sup>	Удельная плотность тока, мА/м <sup>2</sup>	Удельная плотность мощности, мкВт/м <sup>2</sup>
Углеродное волокно с электропроводящим композитом/Углеродное волокно с электропроводящим композитом	2	1,25	3,125
Нержавеющая сталь/Комбинированный катод	2	0,008	0,0032
Нержавеющая сталь/Электропроводящий композит с акт. углем	0,25	0,01	0,0022
Углеродное волокно с электропроводящим композитом/Комбинированный катод	2	3,34	557,8

Таблица 3

#### Электрические характеристики БИЭЦ с протообменной мембраной

Анод/катод	Площадь анода, см <sup>2</sup>	Удельная плотность тока, мА/м <sup>2</sup>	Удельная плотность мощности, мВт/м <sup>2</sup>
Углеродное волокно с электропроводящим композитом/Комбинированный катод	0,38	31	10,34

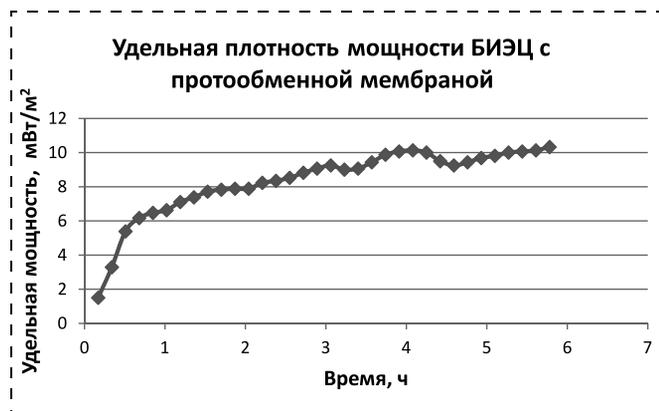


Рис. 12. Характеристики удельной выходной мощности БИЭЦ с протообменной мембраной

ная плотность выходной мощности БИЭЦ увеличивалась в течение 6 ч и достигла  $10,3 \text{ мВт/м}^2$  (рис. 12).

### Заключение

На основании проведенных в данной работе экспериментальных исследований, направленных на выявление возможности использования недорогих, биосовместимых, доступных материалов в качестве электродов в биоэлектрической ячейке, можно сделать вывод о пригодности для этих целей материалов из углерода, а именно углеродного волокна и войлока. Их последующая обработка в виде нанесения электропроводящего композита и смеси активированного угля с политетрафторэтиленом позволила повысить мощность биотопливного элемента, которая составила  $10,3 \text{ мВт/м}^2$ .

Наблюдение зависимости между выходным напряжением и наличием/отсутствием внешнего освещения говорит о том, что фотосинтез цианобактерий действительно причастен к генерации электронов в исследуемых БИЭЦ. Так, световой отклик ячейки, в которой используется углеродсодержащее волокно с электропроводящим композитом и на аноде, и на катоде, составил около 2 мВ. Использование в этой ячейке комбинированного катода привело к тому, что это значение, как и максимальное напряжение, выросло и составило 32 мВ. Полученные в ходе экспериментов результаты говорят о важной роли культуры цианобактерий *Synechococcus* для процессов электрогенерации.

Для достижения больших значений мощностей были предложены различные варианты конструкций отдельных ячеек биотопливного элемента с учетом всех особенностей применения в них культур цианобактерий, например, ячейки предлагается объединять в матрицы.

Работа поддержана Российским научным фондом в рамках проекта № 21-10-00719.

1. Ren H., Lee H.-S. & Chae J. Miniaturizing microbial fuel cells for potential portable power sources: promises and challenges // *Microfluid. Nanofluidics*. 2012, Vol. 13. P. 353–381.

2. Logan B. E., Rabaey K. Microbial conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies // *Science* 337. 2012. P. 686–690.

3. McCormick, A. J. Bombelli P., Bradley R. W., Thorne R. et al. Biophotovoltaics: oxygenic photosynthetic organisms in the world of bioelectrochemical systems // *Energy Environ. Sci*. 2015. N. 8. P. 1092–1109.

4. Sekar N., Ramasamy R. P. Recent advances in photosynthetic energy conversion // *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.* 2014. Vol. 22. P. 19–33.

5. Pérez-Pérez M. E., Martín-Figueroa E., Florencio F. J. Photosynthetic Regulation of the Cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803 Thioredoxin System and Functional Analysis of TrxB (Trx x) and TrxQ (Trx y) // *Thioredoxins. Molecular plant*. 2009. Vol. 2. P. 270–283.

6. Sekar N., Ramasamy R. P. Recent advances in photosynthetic energy conversion // *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.* 2014. Vol. 22. P. 19–33.

7. Bombelli P., Bradley R. W., Scott A. M. et al. Quantitative analysis of the factors limiting solar power transduction by *Synechocystis* sp. PCC 6803 in biological photovoltaic devices // *Energy Environ. Sci*. 2011. Vol. 4. P. 4690–4698.

8. Granqvist C. G. Transparent conductors as solar energy materials: a panoramic review // *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2007. Vol. 91. P. 1529–1598.

9. Herbert G. J., Iniyar S., Sreevalsan E., Rajapandian S. A review of wind energy technologies // *Renew Sustain Energy Rev.* 2007, Vol. 11. P. 1117–1145.

10. Antonio Fd. O. Wave energy utilization: a review of the technologies // *Renew Sustain Energy Rev.* 2010. Vol. 14. P. 899–918.

11. Lund J. W., Freeston D. H., Boyd T. L. Direct utilization of geothermal energy // 2010 worldwide review. *Geothermics*. 2011. Vol. 40. P. 159–180.

12. Panwar N. L., Kaushik S. C., Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2011. Vol. 15. P. 1513–1524.

13. Sharaf O. Z., Orhan M. D. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 32. An overview of fuel cell technology. P. 810–853.

14. Pudova A. V., Mandrik I. V., Kolesova A. D. et al. Output Power of Miniature Bio Fuel Cell versus Anode and Cathode Material Type // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2021. P. 1808–1813. DOI: 10.1109/EIConRus-51938.2021.9396271.

15. Pudova A. V., Mandrik I. V., Kolesova A. D. et al. Miniature BioFuel Cell for Photogeneration of Electricity Based on Cyanobacteria, 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2020. P. 1571–1574. DOI: 10.1109/EIConRus-49466.2020.9039236.

16. Fischer F. Photoelectrode, photovoltaic and photosynthetic microbial fuel cells // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier. 2018. Vol. 90 (C). P. 16–27.

17. Nishio K., Hashimoto K., Watanabe K. Light/electricity conversion by a self-organized photosynthetic biofilm in a single-chamber reactor // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2009. Vol. 86. P. 957–964.

18. **Zou Y., Pisciotta J., Billmyre B., Baskakov I. V.** Photosynthetic Microbial Fuel Cells With Positive Light Response // *Biotechnology and Bioengineering*. 2009. Vol. 86. P. 939–946.

19. **Barber J.** Photosynthetic energy conversion: natural and artificial // *Chem. Soc. Rev.* 2009. Vol. 38. P. 185–196.

20. **Громов Б. В.** Цианобактерии в биосфере // *Соросовский образовательный журнал*. 1996. № 9. С. 33–39.

21. **Cyprien V., Heinicke C., Ramalho T. P.** et al. A Low-Pressure, N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Atmosphere Is Suitable for Cyanobacterium-Based Life-Support Systems on Mars // *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12.

22. **Choi Y., Park J. M.** Enhancing biomass and ethanol production by increasing NADPH production in *Synechocystis* sp. PCC 6803 // *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 213. P. 54–57.

23. **Sartori R. B., Severo I. A., Santos A. M.** et al. Biodegradable Plastics from Cyanobacteria // *Materials Research Foundations*. 2021. Vol. 99. P. 269–289.

24. **Abed R. M. M., Dobretsov S., Sudesh K.** Applications of cyanobacteria in biotechnology // *Journal of Applied Microbiology*. 2009. Vol. 106. P. 1–12.

25. **Lai B., Schneider H., Tschörtner J.** et al. Technical-scale biophotovoltaics for long-term photo-current generation from

*Synechocystis* sp. PCC6803 // *Biotechnology and Bioengineering*. 2021. P. 1–12.

26. **Ng F., Phang S., Iwamoto M.** et al. Algal Biophotovoltaic Devices: Surface Potential Studies // *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2020. Vol. 28. P. 10511–10520.

27. **Mccormick A. J., Bombelli P., Scott A. M.** et al. Photosynthetic biofilms in pure culture harness solar energy in a mediatorless bio-photovoltaic cell (BPV) system // *Energy Environ.* 2011. Vol. 4. P. 4699–4709.

28. **Pisciotta J. M., Zou Y., Baskakov I. V.** Light-dependent electrogenic activity of Cyanobacteria // *PLoS ONE*. 2010. Vol. 5. P. 1–10.

29. **Bombelli P., Zarrouati M., Thorne R. J.** et al. Surface morphology and surface energy of anode materials influence power outputs in a multi-channel mediatorless bio-photovoltaic (BPV) system // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2012. Vol. 14. P. 1222–12229.

30. **Wenzel T., Härtter D., Bombelli P.** et al. Porous translucent electrodes enhance current generation from photosynthetic biofilms // *Nat. Commun.* 2018. Vol. 9. P. 1–9.

31. **Zhang J. Z., Bombelli P., Sokol K. P.** et al. Photoelectrochemistry of photosystem II in vitro vs in vivo // *J. Am. Chem. Soc.* 2018. Vol. 140. P. 6–9.

**T. M. Zimina**, Ph. D, Associate Professor, e-mail: tmzimina@gmail.com, **A. V. Pudova**, Engineer, **I. V. Mandrik**, Engineer, **A. O. Gataullin**, student, CMID, Saint-Petersburg State University "LETI", Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, cmid\_leti@mail.ru

*Corresponding author:*

**Mandrik Ivan V.**, Engineer, CMID, Saint-Petersburg State University "LETI", Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation e-mail: ivmandrik@etu.ru

## Bioelectric Energy Sources based on Cyanobacteria

*Received on February 02, 2022*

*Accepted on February 28, 2022*

*Bioelectric energy sources based on photosynthetic organisms, cyanobacteria, capable of converting solar energy into electrical energy. The use of the photosynthesis process as a renewable energy source for generating electrical energy is seen as a replacement for fossil fuels. The study evaluate biofuel cell based on *Synechococcus* fabricated with different types of carbon electrodes. A design of a single-chamber cell with a proto-exchange membrane has been developed. The demonstrated battery achieves power density 10.3 mW/m<sup>2</sup>*

**Keywords:** cyanobacteria, biotechnology, photosynthesis, *synechococcus*, carbon fiber

*For citation:*

**Zimina T. M., Pudova A. V., Mandrik I. V., Gataullin A. O.** Bioelectric Energy Sources Based on Cyanobacteria, *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 208–216.

DOI: 10.17587/nmst.24.208-216

### References

1. **Ren H., Lee H.-S., Chae J.** Miniaturizing microbial fuel cells for potential portable power sources: promises and challenges, *Microfluid. Nanofluidics*, 2012, vol. 13, pp. 353–381.

2. **Logan B. E., Rabaey K.** Microbial conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies, *Science*, 2012, vol. 337, pp. 686–690.

3. **McCormick A. J., Bombelli P., Bradley R. W., Thorne R.** et al. Biophotovoltaics: oxygenic photosynthetic organisms in the world of bioelectrochemical systems, *Energy Environ. Sci.*, 2015, vol. 8, pp. 1092–1109.

4. **Sekar N., Ramasamy R. P.** Recent advances in photosynthetic energy conversion, *J. Photochem. Photobiol. C Photochem.* 2014, Rev. 22, pp. 19–33.

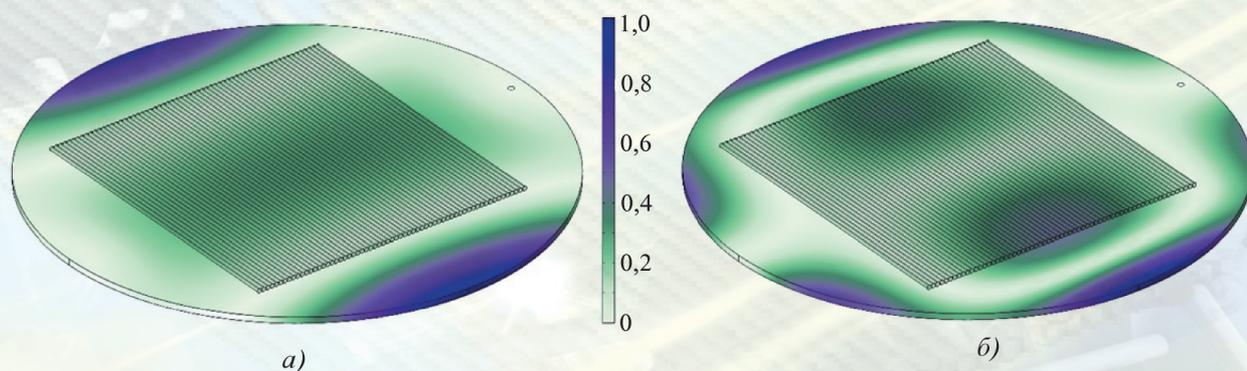
5. Pérez-Pérez M. E., Martín-Figueroa E., Florencio F. J. Photosynthetic Regulation of the Cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803 Thioredoxin System and Functional Analysis of TrxB (Trx x) and TrxQ (Trx y), *Thioredoxins. Molecular plant*, 2009, vol. 2, pp. 270–83.
6. Sekar N., Ramasamy R. P. Recent advances in photosynthetic energy conversion, *J. Photochem. Photobiol. C Photochem*, 2014, Rev 22, pp. 19–33.
7. Bombelli P., Bradley R. W., Scott A. M. et al. Quantitative analysis of the factors limiting solar power transduction by *Synechocystis* sp. PCC 6803 in biological photovoltaic devices, *Energy Environ. Sci*, 2011, vol. 4, pp. 4690–4698.
8. Granqvist C. G. Transparent conductors as solar energy materials: a panoramic review, *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2007, vol. 91, pp. 1529–1598.
9. Herbert G. J., Iniyar S., Sreevalsan E., Rajapandian S. A review of wind energy technologies, *Renew Sustain Energy Rev*, 2007, vol. 11, pp. 1117–1145.
10. Antonio Fd. O. Wave energy utilization: a review of the technologies, *Renew Sustain Energy Rev*, 2010, vol. 14, pp. 899–918.
11. Lund J. W., Freeston D. H., Boyd T. L. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review, *Geothermics*, 2011, vol. 40, pp. 159–180.
12. Panwar N. L., Kaushik S. C., Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: a review, *Renew Sustain Energy Rev*, 2011, vol. 15, pp. 1513–1524.
13. Sharaf O. Z., Orhan M. D. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 32. — An overview of fuel cell technology, pp. 810–853.
14. Pudova A. V., Mandrik I. V., Kolesova A. D. et al. Output Power of Miniature Bio Fuel Cell versus Anode and Cathode Material Type, *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2021, pp. 1808–1813. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396271.
15. Pudova A. V., Mandrik I. V., Kolesova A. D. et al. Miniature BioFuel Cell for Photogeneration of Electricity Based on Cyanobacteria, *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2020, pp. 1571–1574. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039236.
16. Fischer F. Photoelectrode, photovoltaic and photosynthetic microbial fuel cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier*, 2018, vol. 90 (C), pp. 16–27.
17. Nishio K., Hashimoto K., Watanabe K. Light/electricity conversion by a self-organized photosynthetic biofilm in a single-chamber reactor, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2009, vol. 86, pp. 957–964.
18. Zou Y., Pisciotta J., Billmyre B., Baskakov I. V. Photosynthetic Microbial Fuel Cells With Positive Light Response, *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, vol. 86, pp. 939–946.
19. Barber J. Photosynthetic energy conversion: natural and artificial, *Chem. Soc. Rev.*, 2009, vol. 38, pp. 185–196.
20. Gromov B. V. Cianobakterii v biosfere, *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal*, 1996, no. 9, pp. 33–39 (in Russian).
21. Cyprien V., Heinicke C., Ramalho T. P. et al. A Low-Pressure, N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Atmosphere Is Suitable for Cyanobacterium-Based Life-Support Systems on Mars, *Frontiers in Microbiology*, 2021, vol. 12.
22. Choi Y., Park J. M. Enhancing biomass and ethanol production by increasing NADPH production in *Synechocystis* sp. PCC 6803, *Bioresource Technology*, 2016, vol. 213, pp. 54–57.
23. Sartori R. B., Severo I. A., Santos A. M. et al. Biodegradable Plastics from Cyanobacteria, *Materials Research Foundations*, 2021, vol. 99, pp. 269–289.
24. Abed R. M. M., Dobretsov S., Sudesh K. Applications of cyanobacteria in biotechnology, *Journal of Applied Microbiology*, 2009, vol. 106, pp. 1–12.
25. Lai B., Schneider H., Tschörtner J. et al. Technical-scale biophotovoltaics for long-term photo-current generation from *Synechocystis* sp. PCC6803, *Biotechnology and Bioengineering*, 2021, pp. 1–12.
26. Ng F., Phang S., Iwamoto M. et al. Algal Biophotovoltaic Devices: Surface Potential Studies, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2020, vol. 28, pp. 10511–10520.
27. McCormick A. J., Bombelli P., Scott A. M. et al. Photosynthetic biofilms in pure culture harness solar energy in a mediatorless bio-photovoltaic cell (BPV) system, *Energy Environ.*, 2011, vol. 4, pp. 4699–4709.
28. Pisciotta J. M., Zou Y., Baskakov I. V. Light-dependent electrogenic activity of Cyanobacteria, *PLoS ONE*, 2010, vol. 5, pp. 1–10.
29. Bombelli P., Zarrouati M., Thorne R. J. et al. Surface morphology and surface energy of anode materials influence power outputs in a multi-channel mediatorless bio-photovoltaic (BPV) system, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2012, vol. 14, pp. 1222–12229.
30. Wenzel T., Härtter D., Bombelli P. et al. Porous translucent electrodes enhance current generation from photosynthetic biofilms, *Nat. Commun.*, 2018, vol. 9, pp. 1–9.
31. Zhang J. Z., Bombelli P., Sokol K. P. et al. Photoelectrochemistry of photosystem II in vitro vs in vivo, *J. Am. Chem. Soc.*, 2018, vol. 140, pp. 6–9.

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2, оф. 45. Телефон редакции журнала 8(499) 270-1652. E-mail: nmst@novtex.ru  
 Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.  
 Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Технический редактор Т. А. Шацкая.

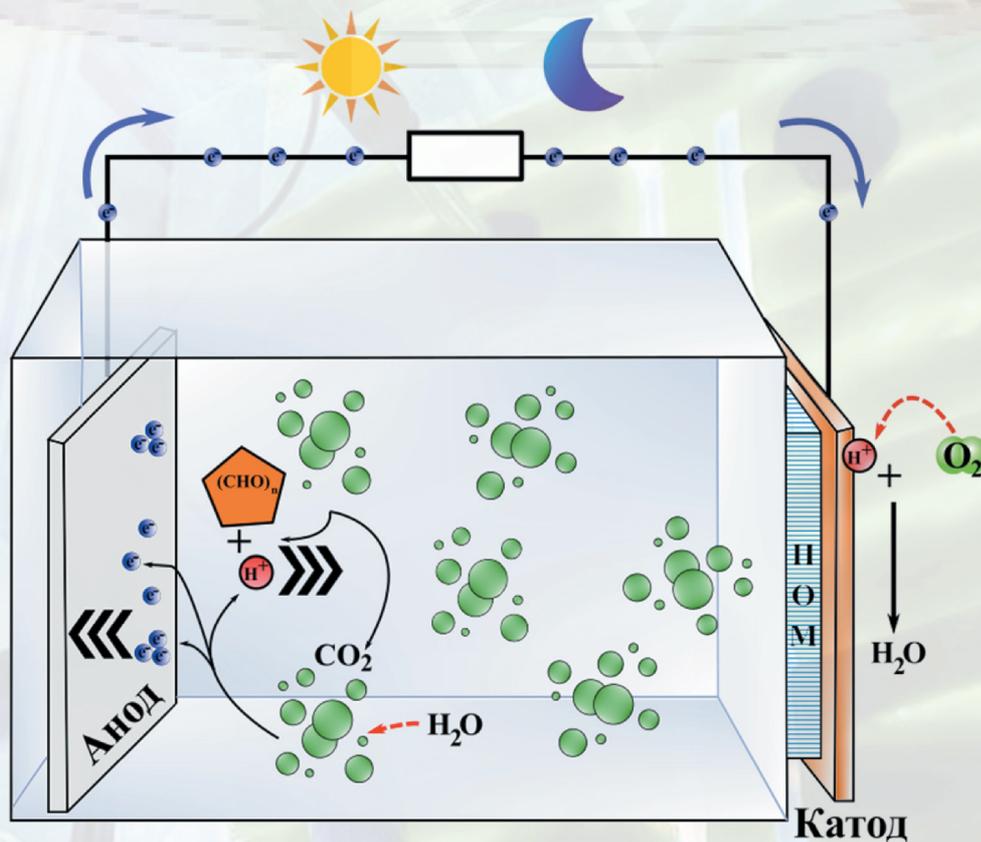
Сдано в набор 20.06.2022. Подписано в печать 26.07.2022. Формат 60×88 1/8. Заказ МС422. Цена договорная  
 Оригинал-макет ООО «Авансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунок к статье Д. В. Савельева, В. И. Мусатова  
**«НОВЫЙ ТИП МАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ СОЗДАНИЯ  
АНИЗОТРОПНОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА»**



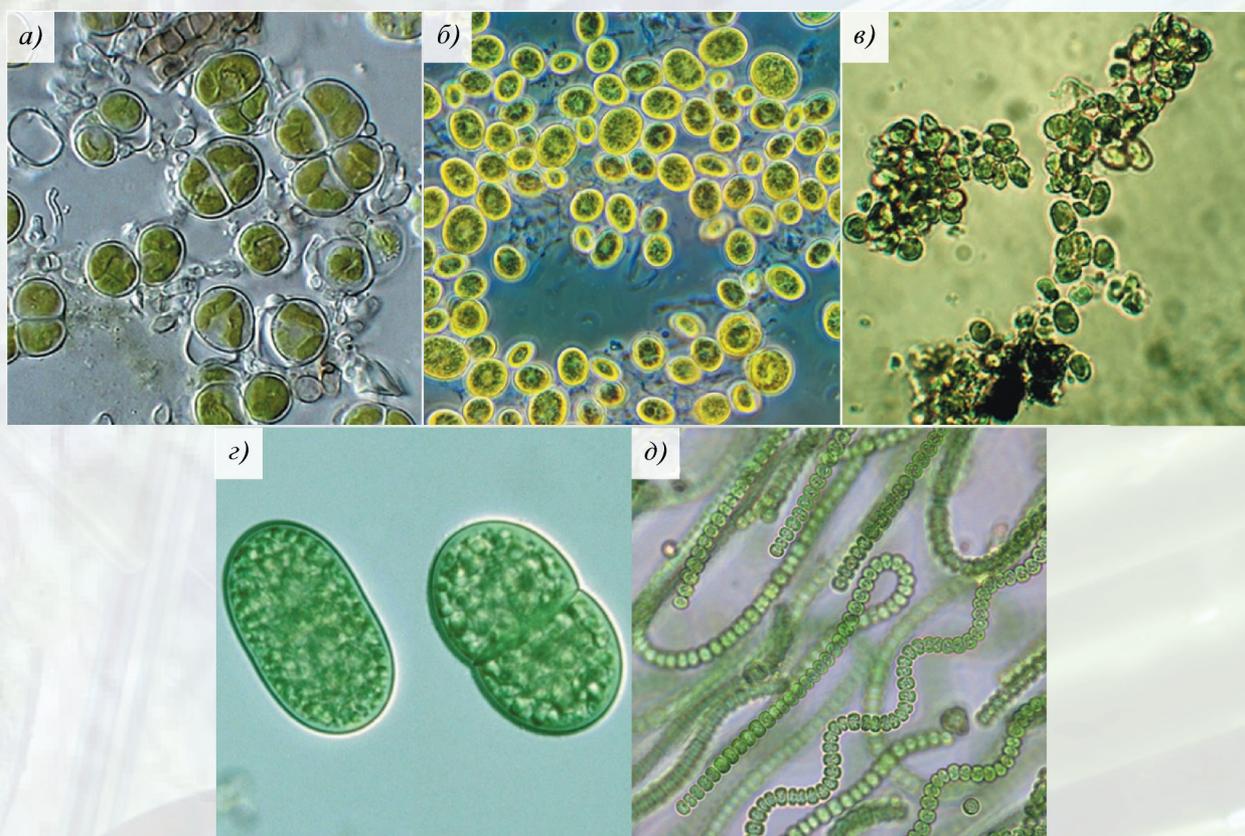
**Рис. 6. Распределение амплитуды относительной деформации композитной структуры для мод на частоте 7,09 кГц (а) и на частоте 14,99 кГц (б)**

Рисунок к статье Т. М. Зиминной, А. В. Пудовой, И. В. Мандрика, А. О. Гатауллина  
**«БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ЦИАНОБАКТЕРИЙ»**

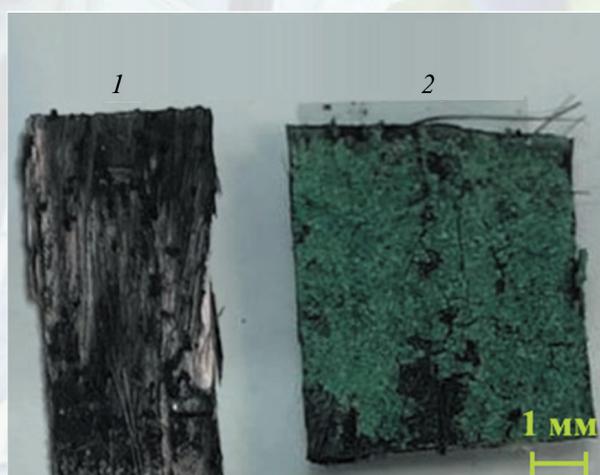


**Рис. 1. Схема однокамерного БИЭЦ на основе цианобактерий**

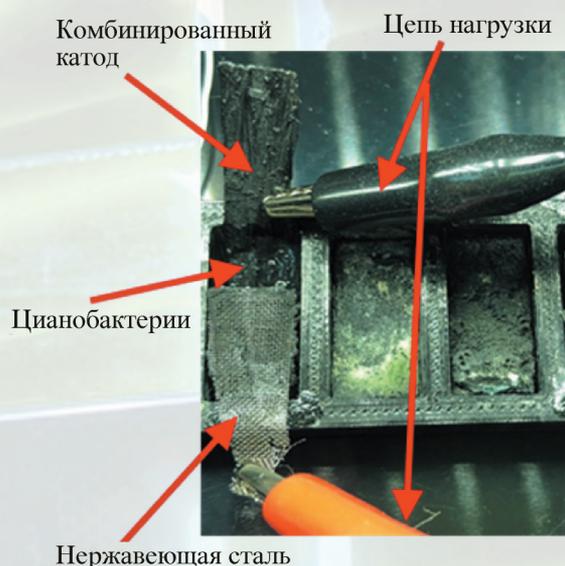
Рисунки к статье Т. М. Зиминной, А. В. Пудовой, И. В. Мандрика, А. О. Гатауллина  
 «БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ЦИАНОБАКТЕРИЙ»



**Рис. 2. Культуры цианобактерий:**  
*a* – Pleurococcus; *б* – Chlorella; *в* – Desmococcus; *г* – Synecococcus; *д* – Nostoc



**Рис. 5. Образец из углеродсодержащего волокна с электропроводящим композитом:**  
 1 – до экспериментов с бактериями;  
 2 – после экспериментов с бактериями



**Рис. 6. Ячейка с комбинированным катодом**