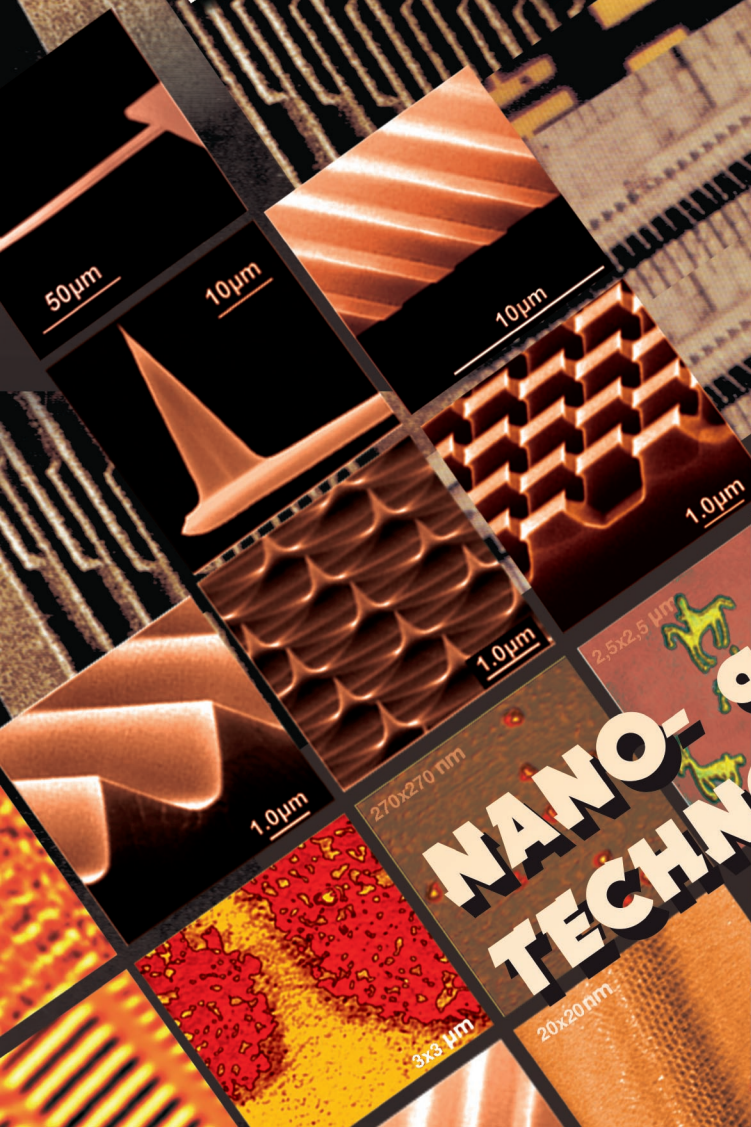


ISSN 1813-8586

# НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 21, № 9, 2019



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

# NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

Vol. 21, No. 9, 2019

The articles are published  
in Russian and English



# 2D MATERIALS 2019

International Congress on Graphene, 2D Materials and Applications

30th September - 04th October 2019

Sochi Olympic Park, Sochi, Russia

## SPECIAL SESSIONS

### Terahertz Technologies and Applications

Organizers: [Dmitry Ponomarev](#) & [Rustam Khabibullin](#)

Special session on Terahertz (THz) technologies will be focused on the discussion of fundamental and applied problems related to the generation and detection of sub-THz and THz radiation as well as its interaction with matter. Our aim is to bring together internationally known experts in the THz field to consider the most critical theoretical and technological insights, discoveries and new fundamental and practical applications. The technical session will cover a wide range of topics including but not limited to photoconductive pulsed and CW emitters/detectors, quantum-cascade lasers, new appearing approaches in THz spectroscopic and imaging systems and other.

## COMMITTEES

### General Co-Chairs



**Valentyn Volkov**

Organizing Committee Chair



**Victor Ryzhii**

Program Committee Co-Chair



**Alexey Nikitin**

Program Committee Co-Chair

### ORGANIZING COMMITTEE

<b>Aleksey Arsenin</b>	MIPT (Russia)
<b>Vitaly Bagan</b>	MIPT (Russia)
<b>Boris Gorshunov</b>	MIPT (Russia)
<b>Rustam Khabibullin</b>	IUHFSE RAS (Russia)
<b>Igor Minin</b>	Tomsk Politechnical University (Russia)
<b>Sergey Morozov</b>	IMT & HPM RAS (Russia)
<b>Dmitry Ponomarev</b>	IUHFSE RAS (Russia)
<b>Maxim Ryzhii</b>	University of Aizu (Japan)
<b>Evgeniya Sheremet</b>	Tomsk Polytechnic University (Russia)
<b>Pavel Sorokin</b>	NUST MISIS (Russia)
<b>Yury Stebunov</b>	University of Manchester (UK)
<b>Dmitry Svintsov</b>	MIPT (Russia)
<b>Artem Voronov</b>	MIPT (Russia)
<b>Elena Zhukova</b>	MIPT (Russia)

### PROGRAM COMMITTEE

<b>Denis Bandurin</b>	Massachusetts Institute of Technology (USA)
<b>Joshua Caldwell</b>	Vanderbilt University (USA)
<b>Alex Fedorov</b>	Russian Quantum Center (Russia)
<b>Alexander Golubov</b>	University of Twente (The Netherlands)
<b>Pablo Alonso González</b>	University of Oviedo (Spain)
<b>Sergey Nikitov</b>	Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (Russia)
<b>Elena Polyakova</b>	NUS Centre for Advanced 2D Materials (Singapore)
<b>Raul Rodriguez</b>	Tomsk Polytechnic University (Russia)
<b>Taiichi Otsuji</b>	Tohoku University (Japan)
<b>Timur Shegai</b>	Chalmers University of Technology (Sweden)
<b>Michael Shur</b>	Rensselaer Polytechnic Institute (USA)

<http://2dmaterials-congress.com/>

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 21. № 9 ✧ 2019

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

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

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

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

Статьи имеют DOI и печатаются в журнале на русском и английском языках

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Издается с 1999 г.

## Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

## Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

## Редакционный совет:

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

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

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

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

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

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

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

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

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

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

## Редакционная коллегия:

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

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

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай)

Басаев А. С., к.ф.-м.н.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Горнев Е. С., д.т.н., проф.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Кузнецов В. И., д.т.н. (Нидерланды)

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

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

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония)

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

Сингх К., к.т.н. (Индия)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенко С. П., д.т.н.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н.

Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

## Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Чугунова А. В. (науч. ред.)

Фокин В. А., к.х.н. (ред. перевода)

Щетинкин Д. А. (сайт)

## СОДЕРЖАНИЕ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

**Иовдальский В. А., Соколов И. А.** Особенности построения приемопередающего модуля L-диапазона на основе нитрид-галиевой технологии . . . . . 515

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

**Дерябкин А. В., Духновский М. П., Куликов Е. Н., Федоров Ю. Ю., Щербаков С. В.** Монолитная замедляющая система из поликристаллического алмаза для ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн . . . . . 522

**Пауткин В. Е.** Фрактальное разрушение металлизации при сборке микромеханических чувствительных элементов . . . . . 527

### ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

**Ангари́та Лорес К. Э., Богатиков Е. В., Бормонтов Е. Н.** Смесительный каскад микрофлюидного чипа с топологией диаграммы Вороного . . . . . 534

**Фомина К. С., Пилькевич А. В., Садков В. Д.** Оптимизация топологии пленочных чип-элементов ВЧ и СВЧ аттенуаторов . . . . . 540

**Драгунов В. П., Остертак Д. И., Синицкий Р. Е.** Анализ микро-электромеханического генератора с периодическим подключением нагрузки . . . . . 546

### МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

**Абрамов И. И.** Сознание человека, или возможности электроники. Часть III . . . . . 555

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

#### ПОДПИСКА:

по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)

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

#### Адрес для переписки:

107076 Москва,

Стромынский пер., д. 4

e-mail: [nmst@novtex.ru](mailto:nmst@novtex.ru)

#### Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

# NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 21

No. 9

2019

## CHIEF EDITOR

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

## DEPUTY CHIEF EDITOR

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

## DEPUTY CHIEF EDITOR

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

## Editorial council:

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

## Editorial board:

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

## Editorial staff:

Antonov B. I. (Director Publ.)  
 Lysenko A. V. (Executive secretary)  
 Chugunova A. V.  
 Fokin V. A., Cand. Sci. (Chem.)  
 Shehetinkin D. A. (site)

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

## CONTENTS

### MODELLING AND DESIGNING OF MNST

**Iovdalsky V. A., Sokolov I. A.** Specific Features of Designing of an L-band Receiving-Transmitting Module on the basis of GaN Technology . . . . . 519

### SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

**Deryabkin A. V., Dukhnovsky M. P., Kulikov E. N., Fedorov Yu. Yu., Scherbakov S. V.** Monolithic Slow-Wave Structure from a Polycrystalline Diamond for TWT of the Millimeter Band of the Wavelengths . . . 524

**Pautkin V. E.** Fractal Destruction of the Metallization During Assembly of the Micromechanical Sensitive Elements . . . . . 530

### MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

**Angarita Lores K. E., Bogatikov E. V., Bormontov E. N.** Micromixers for Microfluid Chips with the Topology of the Voronoi Diagram . . . 537

**Fomina K. S., Pilkevich A. V., Sadkov V. D.** Optimization of the Topology of the Film Chip Elements of High Frequency and Microwave Attenuators . . . . . 543

**Dragunov V. P., Ostertak D. I., Sinitskiy R. E.** An analysis of the Microelectromechanical Generator with Periodical LOAD connection . . . . . 551

### MOLECULAR ELECTRONICS AND BIOELECTRONICS

**Abramov I. I.** Human Consciousness, or Possibilities of Electronics. Part III . . . . . 565

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



# МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.376.4

DOI: 10.17587/nmst.21.515-521

**В. А. Иовдальский**, д-р техн. наук, нач. лаб., [teh.buro208@gmail.com](mailto:teh.buro208@gmail.com),  
НПП "Исток" им. А. И. Шокина, г. Фрязино, 141190, Московская область,  
**И. А. Соколов**, канд. техн. наук, Генеральный директор — Генеральный конструктор, [sokoloff@niimp.ru](mailto:sokoloff@niimp.ru),  
НИИ Микроприборов им. Г. Я. Гуськова", г. Москва, Зеленоград, 124460, Россия

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ L-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ НИТРИД-ГАЛИЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Поступила в редакцию 04.06.2019

*Рассмотрены основные проблемы и особенности построения приемно-передающего модуля L-диапазона на основе нитрид-галлиевой (GaN) технологии. Приведены результаты разработки, а также экспериментальные данные измерений. В результате разработки удалось создать высокотехнологичный четырехканальный приемно-передающий усилительный модуль с высокой степенью интеграции компонентов: внешние габаритные размеры — не более  $220 \times 200 \times 60$  мм, масса — не более 4,1 кг. Максимальное значение выходной импульсной мощности одного передающего канала составило не менее 450 Вт при типовом значении суммарного коэффициента полезного действия 45 %. Режим работы АВ GaN транзисторов передающих каналов позволил реализовать возможность регулировки выходной мощности в широком диапазоне, начиная от 1 Вт до максимального значения. Применение схемы амплитудной модуляции, основанной на изменении напряжения смещения на затворах транзисторов, позволило минимизировать временные искажения радиоимпульсов и сформировать требуемые фронты и спады выходных радиоимпульсов.*

**Ключевые слова:** приемно-передающий модуль, L-диапазон, импульсная мощность, фронт импульса, спад импульса, коэффициент полезного действия

### Введение

Интенсивное развитие и внедрение современных высокочастотных полевых транзисторов на основе GaN позволило создать промышленные образцы приборов с рекордными значениями выходной мощности и эффективности, которые используются в новейших наземных и бортовых системах радиосвязи и радиолокации [1, 2].

Одна из основных проблем при создании приемно-передающих модулей (ППМ) для активных фазированных антенных решеток (АФАР) заключается в необходимости реализации высокоэффективных передающих каналов при относительно небольших габаритных размерах ППМ.

В настоящей работе рассматриваются особенности построения четырехканального ППМ L-диапазона с суммарной выходной пиковой мощностью не менее 1600 Вт (порядка 400 Вт на канал) при полезном объеме модуля приблизительно 2,5 л. При этом, помимо усиления входных радиоимпульсов до требуемого уровня с необходимым коэффициентом усиления, предъявляются не менее важные

требования наименьшего искажения (ухудшения) спектральных, временных и шумовых характеристик входных радиоимпульсов. Применение полевых GaN транзисторов в передающих каналах ППМ позволило добиться значительных результатов в сравнении с применением биполярных кремниевых транзисторов: при одинаковой выходной импульсной мощности на канал 400...500 Вт коэффициент полезного действия (КПД) канала увеличился с 25 до 45 % [3].

### Особенности построения ППМ

Приемо-передающий канал (ППК) модуля построен по классической схеме: развязка выхода приемного канала (ПРМ) и входа передающего канала (ПРД) осуществляется с помощью Y-циркулятора. Выход ПРД и вход ПРМ объединяются на антенну с помощью X-циркулятора. Ферритовые Y- и X-циркуляторы имеют типовые значения обратных потерь 18...22 дБ.

До недавнего времени импульсные сверхвысокочастотные (СВЧ) усилители мощности (УМ) пе-



редающих каналов строили на биполярных транзисторах по схеме с общей базой, обладающих тем преимуществом, что для их работы требуется только один номинал положительного питающего напряжения, однако имеющих при этом ряд принципиальных недостатков [4]. Биполярные транзисторы, работающие в режиме отсечки коллекторного тока (классы С и D), при отсутствии входного сигнала (режим ПРМ) практически не потребляют энергию от источника питания. Уровень шума на выходе УМ в этом режиме минимальный. Недостатком подобных СВЧ усилителей является сильная зависимость формы огибающей выходного радиоимпульса от уровня входного сигнала, эта форма не позволяет эффективно управлять выходной мощностью.

С появлением мощных импульсных полевых СВЧ транзисторов с изолированным затвором (LDMOS) и полевых транзисторов с  $p-n$ -переходом на основе нитрида галлия ситуация изменилась. Высокий коэффициент передачи позволил проектировать УМ с меньшим числом каскадов, а работа транзисторов в классе АВ дала возможность управлять выходной мощностью УМ в широких пределах путем изменения мощности на входе усилителя [5]. Тестовая плата для оптимального питания по цепи смещения мощного GaN транзистора детально описана и представлена в работе [6].

На затворы транзисторов должны подаваться отрицательные, относительно истока, напряжения смещения, определяющие токи покоя обоих каскадов усилителя. Токи покоя для СВЧ GaN транзисторов средней мощности ( $P_{\text{вых}} = 10...40$  Вт) обычно составляют десятки миллиампер. Для мощных транзисторов ( $P_{\text{вых}} = 300...1000$  Вт) значение тока покоя составляет сотни миллиампер [7].

Протекание тока покоя через открытые каналы транзисторов вызывает в них генерацию шума и появление его на выходе усилителя. При работе УМ в составе ППК в режиме ПРМ добавка шума при открытых каналах транзисторов к коэффициенту шума приемного канала составила 2...5 дБ.

Кроме того, в некоторых случаях при большом суммарном коэффициенте передачи УМ и малошумящего усилителя (МШУ) в ППК может возникнуть условие самовозбуждения на частоте, определяемой балансом фаз в замкнутой петле канала.

Устранение этих эффектов можно решать двумя способами. Первый способ: выключение/включение УМ коммутацией напряжения питания стоков транзисторов усилительных каскадов. Второй спо-

соб: манипуляцией напряжений смещения затворов транзисторов.

### Реализация импульсных режимов работы УМ

Реализация первого способа требует применения мощного, относительно высоковольтного, ключевого транзистора (напряжение питания стоков GaN транзисторов составляет 28...100 В), через который будет протекать значительный импульсный ток стоков УМ (20...30 А) в момент усиления входного радиоимпульса. Для быстрой коммутации ключевого транзистора (50...150 нс) требуется быстродействующий драйвер с мощным выходом, способный за короткое время перезарядить большую затворную емкость ключа при его переключении. Вариант схемной реализации такого способа показан на рис. 1.

Второй способ основывается на том, что напряжения отсечки токов стоков GaN транзисторов лежат в пределах минус (3...3,5) В. При этом экспериментально измеренные токи стоков при напряжении питания 50 В имеют значения 15...50 мкА (транзисторы компании *Integra Technologies*). Аналогичные транзисторы компании *Microsemi Corporation* в режиме отсечки имеют токи стоков не более 1...2 мА. При напряжении смещения затворов минус 5 В транзисторы полностью закрыты.

При стандартном для логических и аналоговых микросхем напряжении питания +5 В и -5 В появилась возможность управлять режимом работы транзисторов УМ по цепям смещения, не прибегая к коммутации больших напряжений и токов стоковых цепей транзисторов.

На рис. 2 показана схемная реализация цепей управления затворами транзисторов СВЧ УМ.

Управляется эта схема логическим сигналом "Строб ПРД", который формируется в контроллере ППК. В режиме ПРМ этот сигнал имеет низкий положительный потенциал, в режиме ПРД — высокий. Для того чтобы аналоговые SPDT (*Single Pole*

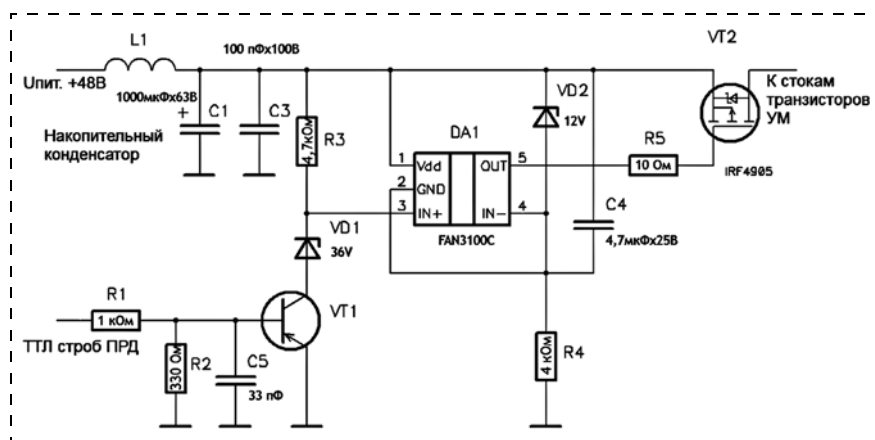


Рис. 1. Схема драйвера с мощным выходом

Fig. 1. Circuit of the driver with a powerful output



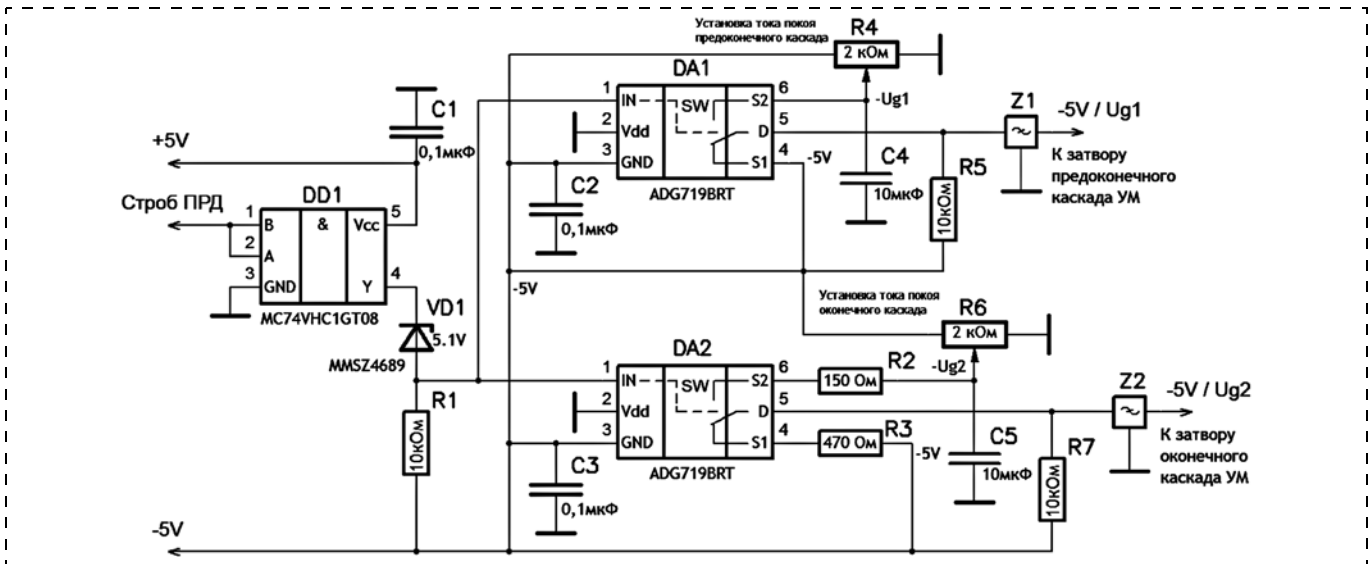


Рис. 2. Схема цепей управления затворами транзисторов СВЧ УМ  
 Fig. 2. Circuits for control of the gates of the transistors of the microwave PA

Double Throw) ключи DA1 и DA2 работали с отрицательными коммутируемыми напряжениями, их выводы питания Vdd соединены с общим проводом схемы, а выводы GND — с источником питания -5 В. На логическом элементе DD1, стабилитроне VD1 и резисторе R1 собрана схема смещения логических уровней сигнала "Строб ПРД", функционирующая в отрицательном диапазоне напряжений.

В моменты времени, когда сигнал "строб ПРД" устанавливается в низкий потенциал (режим ПРМ), на управляющих входах In DD1, DD2 появляется низкий потенциал -5 В и аналоговые ключи переключаются в положение, показанное на рис. 2. На затворы транзисторов УМ подается запирающее напряжение -5 В. Ток покоя каскадов становится практически равным нулю и УМ не генерирует шум, таким образом не оказывая влияния на работоспособность приемного канала.

В режиме ПРД, когда сигнал "строб ПРД" устанавливается в высокий потенциал, на управляющих входах (In DD1, DD2) появляется высокий потенциал (приблизительно 0 В), и аналоговые ключи переключаются в верхнее положение. При этом на затворы транзисторов УМ подаются напряжения с движков потенциометров R4, R6, которые устанавливают рабочие токи каскадов усиления, при этом УМ готов к усилению входного сигнала.

### Результаты экспериментальных исследований

Для представленной схемы (рис. 2) время задержки переднего фронта управляющих импульсов на затворах СВЧ транзисторов УМ относительно переднего фронта импульса "строб ПРД" составляет 15...30 нс.

На рис. 3 и 4 приведены эпюры выходных радиоимпульсов передающего канала при разных уровнях выходной мощности: 2 и 450 Вт, измеренные на фиксированной частоте 1,3 ГГц при напря-

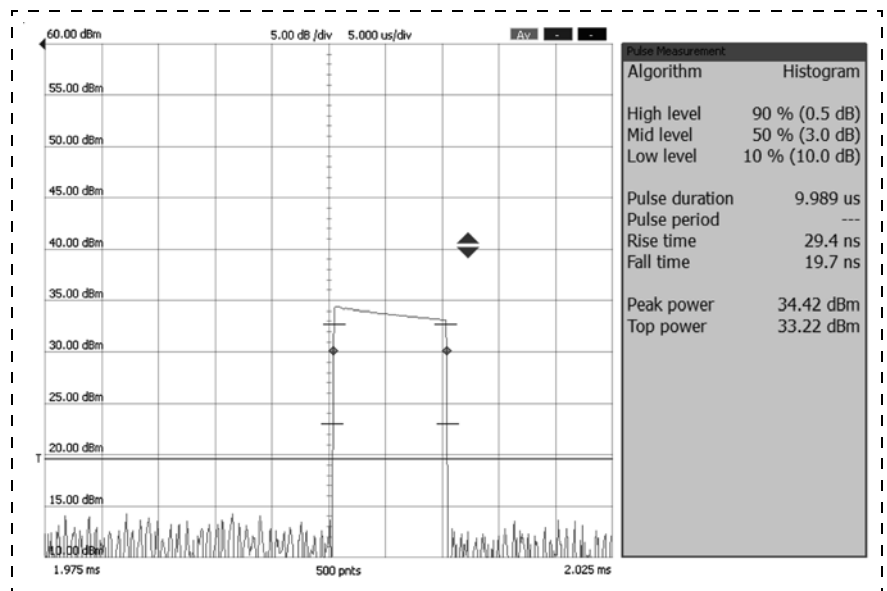


Рис. 3. Эпюра выходного радиоимпульса 2 Вт (измеритель мощности NRP-Z81) на частоте 1300 МГц (параметры входного радиоимпульса:  $t_i = 10$  мкс — длительность импульса,  $Q = 10$  — скважность,  $\tau_\phi = \tau_c = 10$  нс — длительность фронта и спада импульса)

Fig. 3. Diagram of the output radio pulse of 2 W (NRP-Z81 power measuring instrument) on the frequency of 1300 MHz (parameters of the input radio pulse:  $t_p = 10$   $\mu$ s — duration of a pulse,  $Q = 10$  — pulse ratio,  $\tau_r = \tau_f = 10$  ns — duration of the rise time and the fall time)



**Типовые характеристики передающего канала**  
Standard characteristics of the transmitting channel

Частота, ГГц Frequency, GHz	Уровень выходной импульсной мощности, Вт Level of the output pulse power, W	Суммарный ток потребления, А/значение КПД, % Total consumption current A/coefficient of efficiency, %	Длительность фронта импульса, нс Duration of the pulse rise, ns	Длительность спада импульса, нс Duration of the pulse fall, ns	Скол импульса, дБ Pulse cleavage, dB
1.25	503	2.38/42	30	17	0.55
1.35	504	2.22/45	32	15	0.34
1.40	496	2.12/47	34	17	0.24
1.55	446	0.24/47	37	17	0.05

**Примечания:** для частот 1,25–1,40 ГГц длительность импульса составляет 20 мкс, скважность — 10; для частоты 1,55 ГГц длительность импульса составляет 0,7 мкс, скважность — 80.

**Notes:** for frequencies of 1.25–1.40 GHz the pulse duration equals to 20 μs, pulse ratio — 10; - for frequency of 1.55 GHz the pulse duration equals to 0.7 μs, pulse ratio — 80.

жении питания транзисторов  $U_c = 50$  В и токе покоя  $I_{\text{пок}} = 100$  мА.

Из данных рис. 3 и 4 видно, что передающий канал способен работать в широком диапазоне выходных мощностей при незначительном изменении формы огибающей радиоимпульса.

Дополнительной функцией схемы (см. рис. 2) является возможность формирования фронта и спада выходного радиоимпульса УМ. Резистор R2 и суммарная емкость затворной цепи оконечного каскада определяют длительность фронта выходного радиоимпульса, а R3 — длительность спада.

Коэффициент полезного действия передающего канала на биполярных транзисторах с учетом всех потерь тракта, включая циркуляторы, составляет 25...28 % [8]. Передающий канал на основе GaN транзисторов имеет типовое значение КПД

45 % при той же выходной импульсной мощности около 500 Вт.

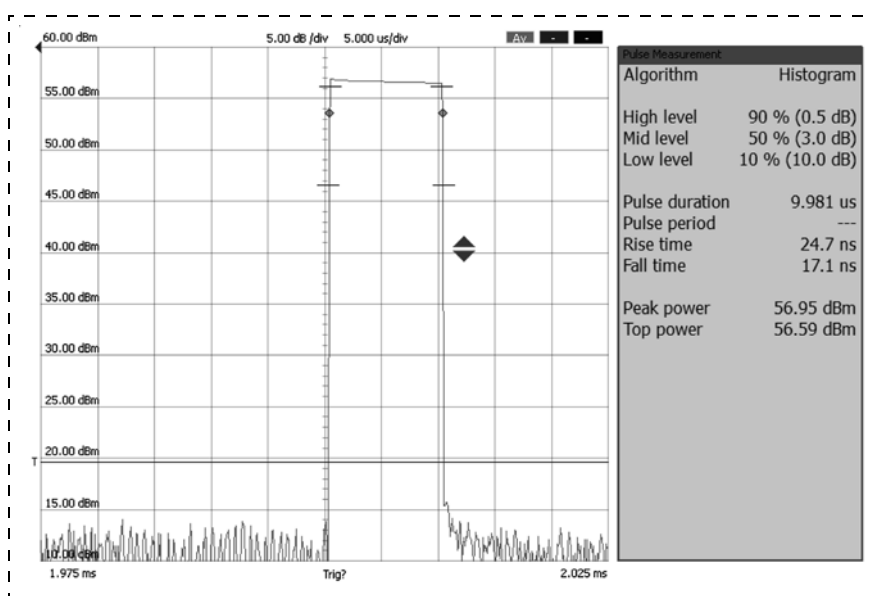
Более высокое значение КПД объясняется тем, что GaN транзисторы обеспечивают больший приблизительно на 7...10 дБ коэффициент передачи и являются более высокочастотными по сравнению с кремниевыми биполярными транзисторами (граничная частота на порядок выше). Кроме того, входной и выходной импедансы GaN транзисторов значительно выше, чем у биполярных транзисторов. Поэтому для согласования каскадов применяют более простые входные и выходные согласующие цепи с меньшими СВЧ потерями. Наконец, два каскада согласовать гораздо проще, чем три, и эффективность согласования увеличивается как минимум ввиду меньшего (на одну) числа согласующих цепей.

При модуляции по стоку при высоких напряжениях и токах ключа наблюдается незначительная утечка тока в паузах, что, кроме того, приводит к увеличению шума в паузах, когда работает приемный канал.

Типовые характеристики передающего канала в целом, измеренные на высокочастотном выходном разъеме модуля, приведены в таблице.

### Заключение

В результате разработки удалось создать высокотехнологичный четырехканальный приемопередающий усилительный модуль с высокой степенью интеграции компонентов, что позволило полностью удовлетворить заданным техническим требованиям и выполнить требования по массогабаритным показателям (внешние размеры — 220 × 200 × 60 мм, масса — 4,1 кг). Модуль имеет высокие значения выходной импульсной мощности с возможностью



**Рис. 4.** Эпо́ра выходного радиоимпульса 450 Вт (измеритель мощности NRP-Z81) на частоте 1300 МГц (параметры входного радиоимпульса:  $t_{\text{и}} = 10$  мкс — длительность импульса,  $Q = 10$  — скважность,  $\tau_{\text{ф}} = \tau_{\text{с}} = 10$  нс — длительность фронта и спада импульса)

*Fig. 4. Diagram of the output radio pulse of 450 W (NRP-Z81 power measuring instrument) at the frequency of 1300 MHz (parameters of the input radio pulse:  $t_p = 10$  μs — duration of a pulse,  $Q = 10$  — pulse ratio,  $\tau_r = \tau_f = 10$  ns — duration of the rise time and the fall time)*

ее регулировки, что потенциально позволяет расширить угол сканирования бортовой АФАР и сформировать диаграмму направленности с низким уровнем боковых лепестков. Применение схемы амплитудной модуляции, основанной на изменении напряжения смещения на затворах транзисторов, позволило минимизировать временные искажения радиоимпульсов и сформировать требуемые фронты и спады выходных радиоимпульсов.

#### Список литературы

1. Кулиев М. В. Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2017. Выпуск 2 (245). С. 18–28.
2. Кищинский А. А. Твердотельные СВЧ усилители мощности на нитриде галлия — состояние и перспективы развития. Материалы 19-й Крымской международной конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь: Вебер, 2009. С. 12–16.
3. Соколов И. А., Скичко Д. Ю., Фунда В. Н. Сборник докладов Международной конференции "Микроэлектрони-

ка—2015", "Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение", Алушта, 2015. С. 662–664.

4. Koyama D., Barsegyan A., Walker J. Implications of Using kW level GaN Transistors in Radar and Avionic Systems // IEEE COMCAS Conference, November 2–4, 2015, Tel Aviv, Israel.

5. Krishnamurthy K., Martin J., Landberg B., Vetury R., Poulton M. J. Wideband 400 W Pulsed Power GaN HEMT Amplifiers // 2008 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. June 2008. P. 303–306.

6. Bias module for 50 V GaN demonstration boards. Application note AN11130 © Ampleon The Netherlands Rev. 2. — 1 September 2015. URL: <http://www.ampleon.com>.

7. Formicone G., Burger J., Custer J. 150 V-Bias RF GaN for 1 kW UHF Radar Amplifiers", 2016, IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 23–26 Oct., Date Added to IEEE Xplore: 24 November 2016, Austin, TX, USA. P. 1–4.

8. Семенин С. Н., Соколов И. А., Фунда В. Н., Скичко Д. Ю., Бац А. В. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2012–2014 / Под ред. Ю. И. Белого. М.: Радиотехника. 2013. С. 55–72.

V. A. Iovdalsky, D. Sc., Head of Laboratory, [teh.buro208@gmail.com](mailto:teh.buro208@gmail.com), NPP Istok, Fryazino, Moscow Region, Russian Federation,

I. A. Sokolov, Ph. D., Director General — Chief Designer, [sokoloff@niimp.ru](mailto:sokoloff@niimp.ru), Scientific Research Institute of Microdevices named after G. Guskov, Zelenograd, Moscow, 124460, Russian Federation

Corresponding author:

Iovdalsky Victor A., D. Sc., Head of Laboratory, NPP Istok, Fryazino, Moscow Region, Russian Federation, [teh.buro208@gmail.com](mailto:teh.buro208@gmail.com)

## Specific Features of Designing of an L-band Receiving-Transmitting Module on the basis of GaN Technology

Received on June 04, 2019  
Accepted on June 24, 2019

*The authors considered the main problems and specific features concerning designing of an L-band receiving-transmitting module on the basis of GaN technology. They presented the results of the development and experimental measurements. Due to the implemented work a hi-tech four-channel receiving-transmitting module with a high integration of the components was developed: its external dimensions were not more than  $220 \times 200 \times 60$  mm, weight — not more than 4.1 kg. The maximal output pulse peak power of one transmitting channel was not less than 450 W at the typical value of the total coefficient of efficiency of 45 %. The operating mode of the AB GaN transmitting transistors allowed the authors to control the output power in a wide range — from 1 W up to the maximal value. Application of the amplitude modulation based on the bias voltage of the transistors' gates made it possible to minimize the time distortions and form the required rise and fall times of the output radio pulses.*

**Keywords:** receiving-transmitting module, L-band, pulse power, pulse rise time, pulse fall time, efficiency

For citation:

Iovdalsky V. A., Sokolov I. A. Specific Features of Designing of an L-band Receiving-Transmitting Module on the basis of GaN Technology, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 9, pp. 515–521.

DOI: 10.17587/nmst.21.515-521

### Introduction

Intensive development and introduction of modern microwave field transistors on the basis of GaN allowed us to create industrial samples of the devices with the record values of the output power and efficiency, which are used in the state-of-the-art land and onboard radio communication and radar-location systems [1, 2].

One of the main problems in development of the receiving-transmitting modules (RTM) for the active phased arrays (APA) is realization of highly effective transmitting channels, while preserving rather small overall dimensions of RTM.

The given work presents specific features of development of a four-channel L band RTM with a total



output peak power not less than 1600 W (about 400 W per channel) at the net volume of the module of about 2.5 l. At the same time, besides amplification of the input radio pulses up to the required level with the necessary coefficient of amplification, not less important are the requirements to the lowest distortion (deterioration) of the spectral, temporary and noise characteristics of the input radio pulses. Application of the field GaN transistors in the transmitting channels (TR) allowed us to achieve considerable results in comparison with the use of the bipolar silicon transistors: at the identical output pulse power per channel of 400... 500 W the coefficient of efficiency of a channel increased from 25 up to 45 % [3].

### Specific features of RTM construction

The receiving-transmitting channel (RTC) of the module is constructed according to the classical circuit: decoupling of the output of the receiving channel (RC) and input of the TR is carried out by means of a  $Y$ -circulator. The output of TR and the input of CR are combined in the antenna by means of the  $X$ -circulator. The ferrite  $Y$ - and  $X$ -circulators have standard values of the return losses of 18...22 dB.

Until recently the pulse (microwave) power amplifiers (PA) of the transmitting channels were constructed on the bipolar transistors according to the circuit with a common base, which had the advantage that their operation required only one nominal of the positive supply voltage, however, at the same time, it had a number of basic drawbacks [4]. The bipolar transistors working in the mode of a cut-off of the collector current (classes C and D), in absence of the input signal (receiving mode) practically do not consume energy from the power supply. The noise level at the output of PA in this mode is minimal. A drawback of such microwave amplifiers is a strong dependence of the form, bending around the output radio pulse, on the level of the input signal, and this form does not make it possible to control the output power effectively.

The situation changed when powerful pulse field microwave transistors appeared with the insulated gate (LDMOS) and the field transistors with  $p-n$  junction on the basis of the gallium nitride. The high transmission coefficient made it possible to design PA with a smaller number of cascades, while operation of the transistors of AB class gave a chance to control the output power of PA over a wide range due to variation of power at the input of an amplifier [5]. A test board for the optimal power supply along the bias chain of a powerful GaN transistor is described in detail and presented in the work [6].

On gates of the transistors, the negative in relation to the source, currents of the bias voltage defining the rest currents of both cascades of the amplifier, should be supplied. The rest currents for the microwave GaN transistors of average power ( $P_{\text{out}} = 10...40$  W) are usually equal to tens of mA. For powerful transistors

( $P_{\text{out}} = 300...1000$  W) the value of the rest current equals to hundreds of mA [7].

Course of the rest current through the open channels of the transistors causes in them a generation of noise and emergence of it at the output of the amplifier. During operation of PA as a part of RTC in the receiving mode the noise additive at the open channels of the transistors to the noise coefficient of the receiving channel was 2...5 dB.

Besides, in certain cases, at a big total coefficient of PA transmission and a low-noise amplifier (LNA) in RTC there can be a self-excitation condition on the frequency determined by the balance of phases in a closed loop of the channel.

These effects can be eliminated in two ways. The first way: switching off/on of PA by switching of the supply voltage for the drains of the transistors of the amplifying cascades. The second way is manipulation of the bias voltages of the transistors' gates.

### Realization of PA pulse operating modes

Realization of the first way demands application of a powerful, relatively high-voltage, key transistor (the supply voltage of the drains of the GaN transistors equals to 28...100 V), through which a considerable pulse current of the PA drains (20...30 A) will proceed at the time of amplification of the input radio pulse. A fast switching of the key transistor (50...150 ns) requires a high-speed driver with a powerful output, capable to recharge quickly the big gate capacity of the key during its switching. A version of the circuit realization of such method is shown in fig. 1.

The second method is based on the fact that the cut-off voltage of the currents of the drains of the GaN transistors is within the limits of minus (3...3.5) V. At the same time, the experimentally measured currents of the drains at the supply voltage of 50 V have the values of 15...50 mA (the transistors from Integra Technologies Company). Similar transistors from Microsemi Corporation in the cut-off mode have the currents of the drains not more than 1...2 mA. At the bias voltage of the gates of minus 5 V the transistors are closed completely.

At the supply voltages of +5 V and -5 V, standard for the logical and analog microcircuits, an opportunity appeared to control the operating mode of PA transistors by the bias circuits, without resorting to switching of high voltages and currents of the stock circuits of the transistors.

Fig. 2 presents a circuit realization of the control circuits of the gates of PA microwave transistors.

The circuit is controlled by the logical signal of "TC Strobe" which is formed in the RTC controller. In the receiving mode this signal has a low positive potential, while in the transmitting mode — a high one. In order to make the analog SPDT (Single Pole Double Throw) keys of DA1 and DA2 work with the negative switched voltages, their Vdd power supply leads are connected to

the common wire of the circuit, and the GND leads — to the power supply of minus 5 V. On the logical DD1 element, VD1 stabilatron and R1 resistor the bias circuit of the logical levels of the " TC Strobe" signal is built, functioning in the negative range of voltages.

In the moments when the signal " TC strobe" is set in the low potential (receiving mode), on the control inputs of In DD1, DD2 a low potential  $-5$  V appears and the analog keys switch into the position shown in fig. 2. To the gates of PA transistors the locking voltage  $-5$  V is supplied. The current of rest of the cascades becomes almost equal to zero, PA does not generate noise, and thus exerts no impact on the operability of the receiving channel.

In the transmitting mode when the " TC strobe" signal is set in the high potential, then on the control inputs (In DD1, DD2) a high potential appears (approximately 0 V), and the analog keys switch into the top position. At the same time to the gates of PA transistors the voltages from the contact arms of R4, R6 are supplied, which set the working currents of the amplification cascades, at the same time PA is ready to amplify the input signal.

### Results of the experimental studies

For the presented circuit (fig. 2) the time delay for the forward front of the control pulses on the gates of the microwave PA transistors in relation to the forward front of the " TC strobe" pulse equals to 15...30 ns.

Fig. 3 and 4 present diagrams of the output radio pulses of the transmitting channel at different levels of the output power of 2 and 450 W measured on the fixed frequency of 1.3 GHz at the supply voltage of transistors  $U_d = 50$  V and the quiescent current  $I_q = 100$  mA.

From the data presented in fig. 3 and 4 it is visible that the transmitting channel can operate in a wide range of the output powers at a minor change of the bending-around form of the radio pulse.

An additional function of the circuit (see fig. 2) is a possibility of formation of the rise and fall of the output radio pulse of PA. R2 resistor and the total capacity of the gate circuit of the terminal cascade determine the duration of the forward rise of the output radio pulse, and R3 — the duration of the fall.

The coefficient of efficiency of the transmitting channel on the bipolar transistors with account of all the path losses, including the circulators, equals to 25...28 % [8]. The transmitting channel on the basis of GaN transistors has the standard value of the coefficient of efficiency of 45 % at the same output pulse power of about 500 W.

A higher efficiency value is explained by the fact that the GaN transistors ensure a bigger, approximately by 7...10 dB, coefficient of transmission and are more high-frequency devices in comparison with the silicon bipolar transistors (their boundary frequency is by an order higher). Besides, the input and output impedances of the GaN transistors are much higher, than those

of the bipolar transistors. Therefore, for coordination of the cascades, simpler input and output coordinating circuits with smaller microwave losses are applied. At last, it is much easier to coordinate two cascades, than three ones, and the efficiency of the coordination increases at least due to a smaller (by one) number of the coordinated circuits.

During modulation by drain at high voltages and currents of the key, an insignificant leakage of current in pauses is observed, which, among other things, leads to an increase of the noise in pauses, when the receiving channel works.

The standard characteristics of the transmitting channel in general, measured on the high-frequency output connector of the module, are presented in the table.

### Conclusion

As a result of the work, a hi-tech four-channel receiving-transmitting amplifying module was developed with a high degree of integration of the components, which made it possible to meet completely the set technical requirements and the requirements for the mass-dimensional parameters (the external size —  $220 \times 200 \times 60$  mm, weight — 4.1 kg). The module has high values of the output pulse power with a possibility of its control, which potentially allows us to expand the angle of scanning of the onboard active phased arrays and create the directional pattern with a low level of the side petals. Application of the circuit of the amplitude modulation based on variation of the bias voltages on the gates of the transistors made it possible to minimize the time distortions of the radio pulses and to the required rise and fall times of the output radio pulses.

### References

1. **Kuliev M. V.** Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory. 2017, issue 2 (245), pp. 18—28.
2. **Kishchinskij A. A.** Tverdotel'nye SVCH usiliteli moshchnosti na nitride galliya — sostoyanie i perspektivy razvitiya. ZAO "Mikrovolnovye sistemy".
3. **Sokolov I. A., Skichko D. Yu., Funda V. N.** Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj konferencii "Mikroelektronika—2015", "Integral'nye skhemy i mikroelektronnye moduli: proektirovanie, proizvodstvo i primenenie" (Alushta. 2015), pp. 662—664.
4. **Koyama D., Barsegyan A., Walker J.** Implications of Using kW level GaN Transistors in Radar and Avionic Systems., IEEE COMCAS Conference, November 2—4, 2015, Tel Aviv, Israel.
5. **Poulton M. J., Krishnamurthy K., Martin J., Landberg B., Vetury R.** Wideband 400 W Pulsed Power GaN HEMT Amplifiers, 2008 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., June 2008, pp. 303—306.
6. **Bias** module for 50 V GaN demonstration boards. Application note AN11130 © Ampleon The Netherlands Rev. 2. — 1 September 2015, <http://www.ampleon.com>.
7. **Formicone G., Burger J., Custer J.** 150 V-Bias RF GaN for 1 kW UHF Radar Amplifiers, 2016, IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), pp. 1—4, 23—26 Oct., Date Added to IEEE Xplore: 24 November 2016, Austin, TX, USA
8. **Semenin S. N., Sokolov I. A., Funda V. N., Skichko D. Yu., Bac A. V.** Radiolokacionnye sistemy special'nogo i grazhdanskogo naznacheniya. 2012—2014. Ed. Yu. I. Belyi. Moscow, Radiotekhnika, 2013, pp. 55—72.



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

УДК 546.26 — 162:621.385.632

DOI: 10.17587/nmst.21.522-526

**А. В. Дерябкин**, аспирант, руководитель группы, Istok220@mail.ru, **М. П. Духновский**, нач. отд.,  
**Е. Н. Куликов**, вед. технолог, **Ю. Ю. Федоров**, канд. физ.-мат. наук, зам. нач. отд.,  
**С. В. Щербаков**, канд. техн. наук, зам. ген. директора — директор по научной работе  
НПП "Исток" им. Шокина, г. Фрязино, Московская область

## МОНОЛИТНАЯ ЗАМЕДЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА ДЛЯ ЛБВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Поступила в редакцию 20.03.2019

*Описывается технология создания замедляющей системы для лампы бегущей волны (ЛБВ) миллиметрового диапазона. Замедляющая система полностью выполнена из поликристаллического CVD-алмаза, сформирована в виде меандра, на все поверхности которого нанесена металлизация порядка толщины скин-слоя.*

*Применение CVD-алмаза дает ряд преимуществ: высокая теплопроводность материала обеспечивает эффективный отвод теплоты от замедляющей системы; малый коэффициент теплового расширения и жесткость монолитной конструкции позволяют иметь стабильные характеристики замедляющей системы в широком диапазоне температур; высокая механическая прочность поликристаллического CVD-алмаза позволяет уменьшить геометрические размеры лампы бегущей волны.*

**Ключевые слова:** замедляющая система, меандр, лампа бегущей волны, поликристаллический CVD-алмаз, миллиметровый диапазон длин волн

### Введение

Одной из главных задач современной вакуумной микроэлектроники является освоение миллиметрового диапазона частот.

Миллиметровые источники возбуждения с большой мощностью, широкой полосой и высокой эффективностью привлекательны для многих применений, таких как высокоскоростная беспроводная передача данных, радиолокационное зондирование, спутниковая связь.

Среди электровакуумных приборов миллиметрового диапазона большой интерес вызывает лампа бегущей волны (ЛБВ) с ленточным электронным пучком и планарной замедляющей системой (ЗС) на диэлектрической подложке, обеспечивающая широкую полосу рабочих частот и тепловую устойчивость [1–4].

При переходе в миллиметровый диапазон существенно уменьшаются геометрические размеры прибора и ЗС в том числе. Существуют пределы уменьшения габаритных размеров ЗС, что обусловлено невозможностью проведения технологических процессов. Для разных конструктивных типов ЗС и технологий их формирования эти пределы могут существенно различаться.

Кроме того, с уменьшением размеров конструктивных элементов ЗС возрастает тепловая нагрузка на нее. Способность ЗС ЛБВ рассеивать теплоту является важным фактором, определяющим выходную мощность, стабильность и надежность прибора.

Весьма перспективной представляется конструкция монолитной ЗС, целиком выполненной из поликристаллического алмаза. Данная конструкция имеет ряд преимуществ.

Во-первых, высокая теплопроводность материала (более 1000 Вт/(м·К)) обеспечивает эффективный отвод теплоты от ЗС.

Во-вторых, малый коэффициент теплового расширения и жесткость монолитной конструкции позволяют иметь стабильные характеристики ЗС в широком диапазоне температур.

В-третьих, высокая механическая прочность CVD-алмаза дает возможность уменьшить геометрические размеры ЛБВ.

Широкое применение поликристаллического алмаза в микроэлектронике сдерживается не только его высокой стоимостью, но и сложностью его постростовой обработки. Это связано, в частности с тем, что алмаз является самым твердым и хими-

чески стойким из всех известных материалов. При этом разориентированность отдельных кристаллитов создает дополнительные проблемы в обработке поверхности изделий.

Все вышеперечисленное обуславливает применение инновационных технологий для наноразмерного профилирования поликристаллического алмаза при создании ЗС.

В данной работе рассматривается технология создания замедляющей системы, полностью выполненной из поликристаллического CVD-алмаза, сформированной в виде меандра, на все поверхности алмаза нанесена металлизация порядка толщины скин-слоя.

### Экспериментальная часть

Технологический процесс изготовления ЗС начинается с роста поликристаллического алмаза на кремниевой подложке. Затем алмазную пластину отделяют от кремниевой подложки методом травления кремния в смеси плавиковой и азотной кислот. Далее лазером из пластины поликристаллического алмаза вырезают прямоугольную заготовку необходимых геометрических размеров, из которой и формируется ЗС.

С уменьшением геометрических размеров ЗС возрастают требования к точности ее изготовления и шероховатости поверхностей, морфология которых во многом определяет однородность и характеристики металлической пленки. Кроме того, шероховатость поверхности ЗС увеличивает эффективный путь, проходимый электромагнитной волной и, следовательно, возрастают потери в ЛБВ.

Для формообразования ЗС применяли технологии термического травления и прецизионной лазерной резки.

Сущность технологического процесса термического травления заключается в явлении растворения алмаза металлами переходной группы или сплавами этих металлов при температурах выше 600 °С [5]. При этом алмаз повторяет рельеф и структуру поверхности контактирующего с ним металла.

В данной работе исследовали процессы травления алмаза железом и никелем. Для придания заготовке из алмаза формы ЗС использовали матрицы из железа (рис. 1, см. третью сторону обложки) и никеля, повторяющие обратную (негативную) реплику формы требуемого рельефа.

Одна из наиболее труднопреодолимых проблем — большая разница коэффициента теплового расширения (КТР) алмаза и металла. В связи с этим при термообработке размеры металлической матрицы изменяются в 10 раз больше, чем алмазной заготовки, что учитывалось при изготовлении металлической матрицы.

Известно [6], что железо при температуре 917 °С из  $\alpha$ -Fe с объемноцентрированной кубической

решеткой переходит в  $\gamma$ -Fe с гранцентрированной кубической решеткой, морфология поверхности железа меняется, ухудшается шероховатость поверхности. Вследствие этого минимальное достижимое значение шероховатости поверхности поликристаллического алмаза при температурах 950...1130 °С составляет 3,0...5,0 мкм при скорости процесса травления 30...50 мкм/ч.

В отличие от железа, никель во всем диапазоне температур не изменяет свою гранцентрированную кубическую кристаллическую решетку, и морфология его поверхности не меняется. Это обуславливает возможность получения шероховатости поверхности алмаза в диапазоне 0,3...1,5 мкм. Скорость травления алмаза в этом случае существенно ниже.

В связи с этим термическое травление алмазных заготовок осуществляли в два этапа. На первом этапе для травления алмаза использовали железо, на втором — никель.

Морфологию поверхности пленок поликристаллического алмаза исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью прибора Solver P47 Pro, по данным которого получали АСМ-сканы в 2D- и 3D-формате, а также профилограммы поверхности.

Метод АСМ позволяет проводить трехмерную визуализацию поверхности, что является наглядной демонстрацией особенностей ее обработки.

Параметры шероховатости определяли по полученным изображениям поверхности при размере поля микроскопии 70 × 70 мкм.

На рис. 2 представлены зависимости шероховатости  $R_z$  поверхности поликристаллического алмаза от времени обработки на железе и никеле.

Анализ методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) показал отсутствие железа и никеля в приповерхностной области поликристаллического алмаза, т. е. при таких температурах и

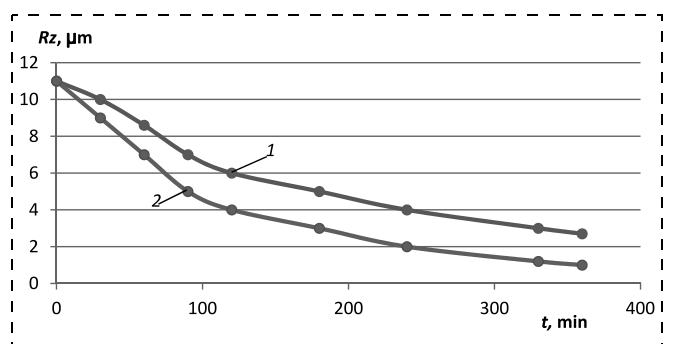


Рис. 2. Зависимости  $R_z$  поверхности поликристаллического алмаза от времени термического травления на пластине железа (кривая 1) и никеля (кривая 2)

Fig. 2. Dependence of  $R_z$  value of the polycrystalline diamond surface on the time of the thermal etching on the plates of iron (curve 1) and nickel (curve 2)



временах диффузия посторонних атомов в алмаз не идет, даже по границам зерен.

Далее с помощью прецизионной лазерной резки формировали меандр из профилированной заготовки. Применение лазерной резки позволяет добиться требуемых точностей геометрических размеров ЗС.

На рис. 3 (см. третью сторону обложки) приведены фотографии фрагментов ЗС после лазерной резки.

При воздействии на алмаз высоких температур (свыше 1000 °С) на операциях шлифовки и лазерной резки на поверхностях, подвергнутых обработке, образуются графитизированные электропроводящие слои. Эти слои удаляли в сернохлорном травителе.

После удаления графитизированного слоя с поверхности алмаза через трафарет проводят напыление W—Ni с толщиной каждого слоя 0,2 мкм. Затем металлизацию покрывают слоем гальванического золота 3 мкм.

Полученная по такой технологии металлизация позволила получить пленку металла на алмазе без переходных графитизированных слоев и с низким тепловым сопротивлением между алмазом и металлом.

На рис. 4 (см. третью сторону обложки) представлен фрагмент планарной монолитной ЗС, полностью выполненной из поликристаллического CVD-алмаза.

## Заключение

Разработанная технология позволяет с большой точностью изготавливать из поликристаллического алмаза замедляющую систему ЛБВ. Использование новой конструкции ЗС позволит существен-

но увеличить выходную мощность широкополосной ЛБВ. Высокая теплопроводность материала обеспечит эффективный отвод теплоты от ЗС, малый коэффициент теплового расширения и жесткость монолитной конструкции позволят иметь стабильные характеристики ЗС в широком диапазоне температур. А благодаря высокой механической прочности CVD-алмаза имеется возможность уменьшить геометрические размеры ЛБВ.

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

## Список литературы

1. **Ulisse G., Krozer V.** W-band traveling wave tube amplifier based on planar slow wave structure // IEEE Electron Device Letters. 2017. Vol. 38, N. 1. P. 126—129.
2. **Sengele S., Jiang H., Booske J. H.** et al. Microfabrication and characterization of a selectively metallized W-band meander-line TWT circuit // IEEE Trans. Electron Devices. 2009. Vol. 56, N. 5. P. 730—737.
3. **Бушуев Н. А., Давидович М. В., Шиловский П. А.** Перспективные замедляющие системы терагерцового диапазона для ЛБВ // Известия Саратовского университета. Новая серия. 2012. Т. 12. Сер. Физика. Вып. 2. С. 64—75.
4. **Бенедик А. И., Рожнев А. Г., Рыскин Н. М., Торгашов Г. В., Шалаев П. Д.** Разработка планарных замедляющих систем на диэлектрических подложках для приборов вакуумной микроэлектроники миллиметрового диапазона // Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика: тезисы докладов X Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во "Техно-Декор", 2015. С. 14—15.
5. **Духновский М. П., Ратникова А. К., Федоров Ю. Ю.** и др. Термическая обработка поликристаллического CVD-алмаза в целях формирования гладкой поверхности // Электронная техника. Серия 1. СВЧ электроника. 2008. Вып. 2 (495). P. 41—46.
6. **Демихов К. Е., Панфилов Ю. В., Никулин Н. К.** и др. Вакуумная техника: Справочник / М.: Машиностроение, 2009. 590 с.

---

**A. V. Deryabkin**, Postgraduate Student, Head of Group, Istok220@mail.ru,

**M. P. Dukhnovsky**, Head of Department, **E. N. Kulikov**, Leading Technologist, **Yu. Yu. Fedorov**, Ph. D., Deputy Head of Department, **S. V. Scherbakov**, Ph. D., Deputy Director General in Charge of Scientific Work, Istok Co., Fryazino, Moscow Region

*Corresponding author:*

**Deryabkin Aleksey V.**, Postgraduate Student, Head of Group, Istok Co., Fryazino, Moscow Region, Istok220@mail.ru

## Monolithic Slow-Wave Structure from a Polycrystalline Diamond for TWT of the Millimeter Band of the Wavelengths

*Received on March 20, 2019*

*Accepted on April 22, 2019*

*This paper describes the technology of creating a slow-wave structure for a traveling wave tube of millimeter wavelength range. The slow-wave structure is completely made of polycrystalline CVD diamond in the form of meander on all surfaces of which multilayer highly adhesive and highly heat-conducting metallization is applied with a thickness of the order of the thickness of the skin layer at the frequency of the traveling-wave tube. The application of CVD diamond provides a number of advantages directly related to the physical and chemical properties of the diamond itself as a material: high thermal conductivity of diamond provides effective and rapid heat removal from the slow-wave structure to the tube body; low coefficient of thermal expansion and rigidity of the monolithic construction of the slow-wave structure will provide stable performance of the traveling-wave tube in a wide temperature range; the high mechanical strength of polycrystalline CVD diamond allows to reduce geometrical dimensions of the traveling-wave tube.*

*The processes of CVD polycrystalline diamond growth on a silicon disk in hydrogen and methane plasma are used in this work. Precision nanoscale diamond processing for the formation of a given shape and quality of the surfaces was carried out according to two methods successively: 1) thermochemical etching on the surface of transition metals (iron and nickel) is the effect of dissolving carbon from diamond in the volume of the above metals under high temperatures over 600 °C; 2) precision laser cutting forms a high-precision form of the meander providing the necessary range of operating frequencies of the traveling-wave tube. Metallization of the given surfaces was carried out by magnetron sputtering in vacuum and galvanic deposition methods.*

**Keywords:** *slow-wave structure, meander, traveling-wave tube, polycrystalline CVD diamond, post growth diamond processing, thermochemical diamond etching, diamond laser cutting, diamond metallization*

*For citation:*

**Deryabkin A. V., Dukhnovsky M. P., Kulikov E. N., Fedorov Yu. Yu., Scherbakov S. V.** Monolithic Slow-Wave Structure from a Polycrystalline Diamond for TWT of the Millimeter Band of the Wavelengths, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 9, pp. 522–526.

DOI: 10.17587/nmst.21.522-526

## Introduction

One of the main tasks of the modern vacuum microelectronics is development of the millimeter range of frequencies.

The millimeter excitation sources with a big power, wide band and high efficiency are attractive for many applications, such as high-speed wireless data transmission, radar sounding, and satellite communication.

Among the electrovacuum devices of the millimeter range of great interest is the traveling-wave tube (TWT) with a ribbon electron beam and a planar slow-wave structure (SWS) on a dielectric substrate ensuring a wide band of the working frequencies and thermal stability [1–4].

Transition to the millimeter range decreases significantly the geometrical sizes of the devices, including SWS. There are limits for reduction of the overall dimensions of SWS, which are explained by impossibility of carrying out of the technological processes. For different constructive types of SWS and the technologies for their formation these limits can differ significantly.

Besides, the reduction of the sizes of the structural elements of SWS increases the thermal load on it. The ability of SWS TWT to disseminate warmth is an important factor, which determines the output power, stability and reliability of a device.

The design of a monolithic SWS made entirely of a polycrystalline diamond is very promising. This design has a number of advantages.

Firstly, a high heat conductivity of the material (more than 1000 W/(m · K)) ensures an effective withdrawal of warmth from SWS.

Secondly, a small coefficient of thermal expansion and rigidity of the monolithic design allow us to have stable characteristics of SWS in a wide range of temperatures.

Thirdly, the high mechanical durability of the CVD diamond makes it possible to reduce the geometrical sizes of TWT.

A wide use of the polycrystalline diamond in microelectronics is restrained not only by its high cost, but al-

so by the complexity of its post-growth processing. In particular, this is connected with the fact that a diamond is the firmest and most chemically stable of all the known materials. At that, the misorientation of its separate crystallites creates additional problems for processing of the products' surface.

All the above-mentioned reasons demand innovative technologies for the nano-dimensional profiling of the polycrystalline diamond during creation of SWS.

This work presents a technology for development of a slow-wave structure, which is made completely of a polycrystalline CVD diamond in the form of a meander, with a skin layer-thick metallization deposited on all the surfaces of the diamond.

## Experimental part

The technological process for manufacturing of SWS begins with growing of a polycrystalline diamond on a silicon substrate. Then the diamond plate is separated from the silicon substrate by the method of etching of the silicon in a mixture of the fluoric and nitric acids.

Then a laser cuts out a rectangular billet of the necessary geometrical sizes from a plate of a polycrystalline diamond, from which SWS is formed.

With reduction of the SWS geometrical sizes the requirements to the accuracy of its production and roughness of the surfaces, the morphology of which in many respects defines the uniformity and characteristics of a metal film, increase. Besides, the roughness of the surface of SWS increases the effective way passed by an electromagnetic wave and, therefore, the losses in TWT increase.

For formation of SWS the technologies of the thermal etching and precision laser cutting were applied.

The essence of the technological process of the thermal etching consists in the phenomenon of the diamond dissolution by the metals of the transitional group or alloys of these metals at temperatures over 600 °C [5]. At that, the diamond copies the relief and the structure of the surface of the metal contacting with it.

The authors of this work investigated the processes of etching of a diamond by iron and nickel. In order to

provide the shape of SWS to a diamond billet, the matrices from iron (fig. 1, see the 3-rd side of cover) and nickel were used, which copied the return (negative) side of the required relief.

One of the most formidable problems was a big difference in the diamond and metal coefficients of thermal expansion (CTE). Due to this during a heat treatment the sizes of a metal matrix varied 10 times more, than those of a diamond billet, which was taken into account during manufacturing of a metal matrix.

As is known [6], at the temperature of 917 °C the iron transforms from  $\alpha$ -Fe with a body-centered cubic lattice into  $\gamma$ -Fe with a face-centered cubic lattice, the morphology of the iron surface changes and the surface roughness worsens. Thereof, the minimal values of roughness of the surface of a polycrystalline diamond achievable at temperatures of 950...1130 °C are 3.0...5.0  $\mu\text{m}$  at the speed of the etching process of 30...50  $\mu\text{m}/\text{h}$ .

Unlike iron, nickel does not change its face-centered cubic crystal lattice in all the range of the temperatures, and the morphology of its surface does not vary. This provides a possibility for receiving the surface roughness of a diamond within the range of 0.3...1.5  $\mu\text{m}$ . In this case the etching speed of a diamond is significantly lower.

In this regard the thermal etching of the diamond billets was carried out in two stages. At the first stage the iron was used for etching of a diamond, at the second stage — nickel.

The morphology of the surface of the polycrystalline diamond films was investigated by the method of the atomic-force microscopy (AFM) by means of Solver P47 Pro instrument, according to the data from which the AFM-scans in 2D and 3D formats and also the surface profilograms were obtained.

The AFM method allows us to have a three-dimensional visualization of the surface, which ensures a better demonstration of the features of its processing.

The roughness parameters were determined by the surface images received at the size of the microscopy field of  $70 \times 70 \mu\text{m}$ .

Fig. 2 presents the dependences of roughness  $R_z$  of the surface of the polycrystalline diamond on the time of processing on iron and nickel.

An analysis by the method of the secondary-ion mass spectrometry (SIMS) demonstrated absence of iron and nickel in near-surface area of the polycrystalline diamond, i.e. at such temperatures and times there was no diffusion of foreign atoms into the diamond, even on the boundaries of the grains.

Then by means of a precision laser cutting a meander was formed out of a profiled billet. Application of laser cutting allows us to achieve the required precision of the SWS geometrical sizes.

Fig. 3 (see the 3-rd side of cover) presents photos of SWS fragments after the laser cutting.

Under the impact of high temperatures (over 1000 °C) on a diamond during operations of grinding and laser cutting, the graphitized electroconductive layers were formed on the surfaces subjected to processing. These layers were removed in a sulphuric-acid etchant.

After removal of the graphitized layer from the diamond surface, W—Ni layers with thickness of 0.2  $\mu\text{m}$  of each layer were deposited through a stencil. Then the metallization was covered with a layer of the galvanic gold of 3  $\mu\text{m}$ .

The metallization received by such technology allowed us to obtain a metal film on the diamond without the transitional graphitized layers and with a low thermal resistance between the diamond and the metal.

Fig. 4 (see the 3-rd side of cover) presents a fragment of the planar monolithic SWS, made completely of a polycrystalline CVD diamond.

## Conclusion

The developed technology allows us to manufacture polycrystalline diamond TWT slow-wave systems with a high accuracy. Use of a new SWS design will make it possible to increase significantly the output power of a broadband TWT. High heat conductivity of the material will ensure an effective heat elimination from SWS, while a small coefficient of thermal expansion and the rigidity of the monolithic design will allow us to have stable characteristics of SWS in a wide range of temperatures. And due to a high mechanical durability of the CVD diamond it is possible to reduce the geometrical sizes of TWT.

*The work was done with the financial support of RFFI grant No. 19-07-00683A.*

## References

1. **Ulisse G., Krozer V.** W-band traveling wave tube amplifier based on planar slow wave structure, *IEEE Electron Device Letters*, 2017, vol. 38, no. 1, pp. 126—129.
2. **Sengele S., Jiang H., Booske J. H.** et al. Microfabrication and characterization of a selectively metallized W-band meander-line TWT circuit, *IEEE Trans. Electron Devices*, 2009, vol. 56, no. 5, pp. 730—737.
3. **Bushuev N. A., Davidovich M. V., Shilovskij P. A.** Perspektivnye zamedlyayushchie sistemy tetragercovogo diapazona dlya LBV, *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya*. 2012. vol. 12, Ser. Fizika, no. 2., pp. 64—75 (in Russian).
4. **Benedik A. I., Rozhnev A. G., Ryskin N. M., Torgashov G. V., Shalaev P. D.** Razrabotka planarnykh zamedlyayushchih sistem na dielektricheskikh podlozhkah dlya priborov vakuumnoj mikroelektroniki millimetrovogo diapazona, "Nanoelektronika, nanofotonika i nelinejnaya fizika": tezisy dokladov X Vseros. konf. molodyh uchenyh, Saratov, Tekhno-Dekor, 2015, pp. 14—15 (in Russian).
5. **Duhnovskij M. P., Ratnikova A. K., Fedorov Yu. Yu.** et al. Termicheskaya obrabotka polikristallicheskogo CVD-almazsa s cel'yu formirovaniya gladkoj poverhnosti, *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1. SVCH elektronika*, 2008, no. 2 (495), pp. 41—46 (in Russian).
6. **Demihov K. E., Panfilov Yu. V., Nikulin N. K.** et al. *Vakuumnaya tekhnika: Spravochnik*, Moscow, Mashchinostroenie, 2009, 590 p. (in Russian).

**В. Е. Пауткин**, канд. техн. наук, гл. специалист,  
АО "НИИФИ", г. Пенза, e-mail: inercial@niifi.ru

## ФРАКТАЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ СБОРКЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Поступила в редакцию 19.03.2019

*Рассмотрены технологические аспекты, связанные с разрушением металлических пленок деталей чувствительных элементов микромеханических акселерометров при их сборке. Определены основные причины, способные вызвать деградацию металлических пленок, предложены рекомендации по устранению данного эффекта.*

**Ключевые слова:** фрактал, чувствительный элемент, электрохимическая коррозия, пленка алюминия, МЭМС

### Введение

Микромеханические акселерометры, созданные по кремниевой МЭМС-технологии, находят применение во многих отраслях промышленности — авиации, автомобилестроении, системах управления объектами в качестве измерителей углов наклона [1, 2]. Важнейшим элементом микромеханического акселерометра емкостного типа является чувствительный элемент, технология сборки которого связана с изготовлением кремниевого кристалла, стеклянных деталей, а также их соединением между собой. Наряду с отработанностью многих технологий изготовления, например нанесения металлизированных площадок на стеклянные детали и сборки чувствительного элемента, периодически возникают отклонения от отработанных технологических процессов. Например, после сборки чувствительного элемента наблюдалось почти полное разрушение металлизации на стеклянных деталях. Характер разрушения алюминиевой металлизации представляет собой дендритную фрактальную структуру с ярко выраженным признаком самоподобия, т. е. по мере увеличения размера изображения наблюдаются те же самые "ветви" металлизации, только имеющие уменьшенные размеры. Указанное заставило обратиться к поиску возможных причин таких отклонений.

### Фракталы в технике

Понятие фрактал, введенное в 70-х годах прошлого столетия [3, 4] для описания сложных самоподобных структур, в настоящее время широко применяется в технике для описания различных процессов, например в области компьютерной обработки информации [5], в области получения наносистем с новыми свойствами [6], синтеза тонких пленок методом золь-гель технологии [7] и др.

Многие исследователи в своих работах наблюдали фрактальные структуры. Например, кремниевые фотоэлектроды, помещенные в раствор  $\text{NH}_4\text{F}$ , демонстрировали масштабные картины фрактального травления при анодных потенциалах около 6 В [8]. Фрактальные структуры управляемо формировались в промежуточной пленке алюминия между стеклом и кремнием при электростатическом соединении по модели двумерной диффузионно-ограниченной агрегации. При этом было отмечено, что формирование фрактальной структуры помогает повысить прочность соединения "кремний — стекло" [9].

В работе [10] описывается процесс коррозии алюминиевой фольги в 1М-растворе  $\text{NaCl}$ . В данном случае процесс коррозии может быть представлен как формирование самоподобной фрактальной геометрии алюминия. Также для пленок алюминия показано, что на процесс анодного растворения алюминия влияют такие параметры, как первоначальное состояние электролита, pH, плотность тока. Присутствие ионов натрия смещает потенциал коррозии в сторону более катодных потенциалов. Гальваностатический электролиз показал, что измеренные концентрации алюминия превышали теоретические значения, рассчитанные по закону Фарадея. Избыток растворенного алюминия, полученного во время гальваностатического электролиза, является первичным вследствие химического растворения алюминия при сильнощелочных условиях [11].

Описано воздействие напряжения порядка 8,5 кВ на поверхность электрета полиэтилентерефталата (PET-а) при различных временах воздействия. При этом поверхность PET-а покрывалась линиями различной размерности [12]. Также исследователями представлены различные модели фрактального растворения веществ [13]. Из представленного анализа видно, что формирование и



исследование фрактальных структур имеют большое значение в различных областях.

### Изготовление чувствительного элемента

Конструктивно чувствительный элемент (рис. 1) состоит из кристалла, выполненного из кремния высокой проводимости, например марок ЭКЭС или КДБ, имеющего ориентацию рабочей плоскости (100). Кристалл содержит подвижную массу, жестко закрепленную на внешней рамке через упругие перемычки. Подвижная масса, внешняя рамка, упругие перемычки выполнены в едином цикле по объемной кремниевой МЭМС-технологии методом жидкостного анизотропного травления кремния [14].

Две стеклянные пластины из щелочного стекла, например марок ЛК-5, ЛК-105, с нанесенными на них емкостными электродами (тонкая пленка металла, чаще всего алюминия) расположены с обеих сторон кристалла. Металлизация обеих стеклянных пластин и подвижная масса кристалла образуют дифференциальный конденсатор, необходимый для функционирования прибора.

Учитывая сложность микромеханических деталей — кремниевого кристалла, стеклянных деталей, и, что особенно важно, необходимость точного соблюдения емкостного зазора между деталями — подвижной массой кристалла и металлизацией стеклянных пластин (который может составлять 8...30 мкм), сборка чувствительного элемента представляет собой ответственную технологическую операцию.

В настоящее время основным способом соединения кремниевых кристаллов и стеклянных деталей данных конструкций является электростатическое соединение (ЭСС), также известное как анодная сварка [15—18]. Ее особенностями являются использование высоких температур соедине-

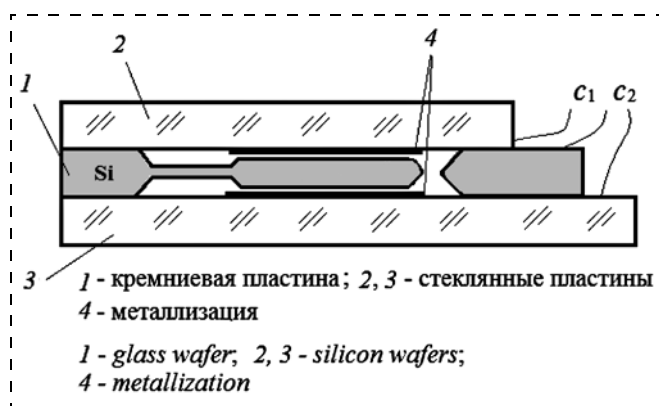


Рис. 1. Чувствительный элемент микромеханического акселерометра

Fig. 1. Sensitive element of a micromechanical accelerometer

ния (350...450 °С) и необходимость подачи постоянного высокого напряжения (400...500 В) определенной полярности на соединяемые детали при времени соединения 10...15 мин. Данные режимы обеспечивают получение микромеханических чувствительных элементов для создания приборов с высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

Однако с редкой периодичностью можно наблюдать такой внешний вид стеклянных деталей с нанесенной металлизацией, как показано на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки).

При этом происходит разрушение (несоединение) чувствительного элемента с полным разрушением металлизации (алюминиевой пленки толщиной порядка 1 мкм) на одной из стеклянных деталей. Характер разрушения алюминиевой металлизации, как было сказано выше, представляет собой дендритную фрактальную структуру.

### Гипотезы разрушения металлизации

**Электрический пробой.** Из литературных источников хорошо известны подобные фрактальные линии, называемые в честь их открывателя линиями Лихтенберга [19]. Данные линии формируются на непроводящих поверхностях, например стекле, и представляют собой линии прохождения электрических зарядов высокой плотности. В данном случае мы имеем дело с проводником (алюминием), хотя и расположенном на стекле. Кроме того, появление линий Лихтенберга связано с электрическим пробоем, что в условиях проведения ЭСС может быть связано только с попаданием посторонних проводящих частиц в емкостной зазор. Учитывая напряжение проведения процесса порядка 400...500 В, ток при коротком замыкании (КЗ) теоретически может достигать десятков ампер. Конструкция установки для проведения процесса ЭСС имеет защиту от короткого замыкания, и на практике КЗ не наблюдалось, что делает эту версию маловероятной.

**Электрохимическая коррозия.** Одной из основных причин отказов пленок алюминия в интегральных микросхемах является его малая коррозионная стойкость. Основными факторами, способствующими ускорению процесса коррозии металлизации, носящей, как правило, электрохимический характер, являются такие, как наличие адсорбированной влаги, электрического потенциала металлизации, повышенная температура окружающей среды и наличие ионных загрязнений. Все перечисленное увеличивает ток коррозии, ускоряя процесс разрушения металлической пленки. Необходимо отметить, что движущей силой процесса электрохимической коррозии является внешний

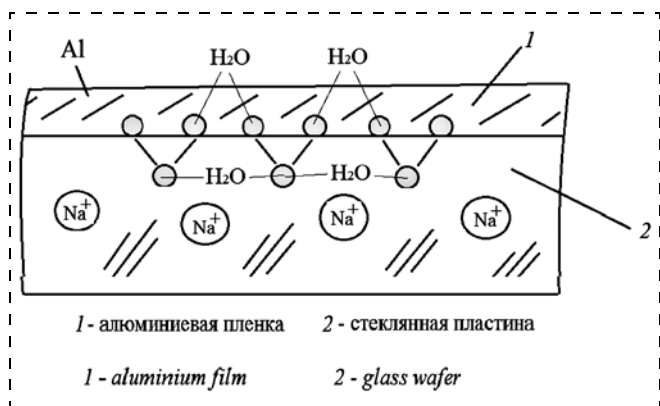


Рис. 3. Эскиз стеклянной пластины с нанесенной пленкой алюминия

Fig. 3. A sketch of a glass plate with the deposited aluminum film

источник тока — так называемая электролитическая коррозия. Наиболее опасными для пленок алюминия являются ионы натрия. В большей степени подвержены коррозии пленки, находящиеся под отрицательным потенциалом, так называемая катодная коррозия [20]. Для алюминиевой металлизации типичный вид дефектов — обрыв проводящих дорожек, в отличие от медной, склонной к созданию дефектов "короткое замыкание".

Как известно, многие оксиды первоначально адсорбируют воду в неподвижном локализованном состоянии при температуре не выше комнатной, с образованием водородных связей адсорбированных молекул воды с нижележащими гидроксильными группами. Такие связи устойчивы при температурах порядка 400 °С. После образования первого неподвижного адсорбированного слоя образуется второй, подвижный слой. Именно эти слои отвечают за миграцию ионов между электродами [21]. На эти адсорбированные слои впоследствии и может быть нанесена алюминиевая пленка. Кроме того, при температурах проведения процесса ЭСС в стекле высвобождаются атомы натрия, что приводит к условиям возникновения электролита. Схематично это представлено на рис. 3.

На изменение электродного потенциала влияют геометрические факторы конструкции, в нашем случае чувствительного элемента. В узких зазорах — например для чувствительного элемента этим зазором является емкостной зазор — затрудняется доступ кислорода, что приводит к смещению электродного потенциала в отрицательную сторону и возникновению гальванической пары "открытая поверхность — щель", где щель является анодом и усиленно корродирует (так называемая щелевая коррозия). Также известно, что нагрев металлических пленок и воздействие на них растягивающих механических напряжений приводит к смещению его потенциала в отрицательную сторону. Таким

образом, нагретые или растянутые участки металлических пленок являются анодами по отношению к остальным участкам пленок и также подвергаются ускоренной коррозии [21].

В случае, когда рассматриваемый чувствительный элемент находится при одной и той же температуре, наличие значительных растягивающих напряжений алюминиевой пленки, нанесенной на стеклянные детали, также может вызвать ускоренную коррозию (рис. 4, 5, см. четвертую сторону обложки).

Как видно из рисунков, обе профилограммы отличаются большой неоднородностью по толщине пленки с участками разрывов, подтверждающих ее полное разрушение.

## Выводы

Учитывая особенности конструкции и условия проведения процесса ЭСС, а именно:

- наличие ионов щелочного металла (натрия) в объеме стекла при проведении процесса ЭСС;
- наличие высоких температур соединения кремниевой и стеклянных деталей;
- наличие малого емкостного зазора чувствительного элемента;
- отсутствие срабатывания установки от короткого замыкания;
- использование неустойчивой к ионам натрия пленки алюминия,

можно сделать заключение, что причиной разрушения тонкой алюминиевой пленки является именно электрохимическая коррозия при условиях возможного напряженного состояния пленки алюминия. Для исключения данного эффекта необходима тщательная химическая очистка поступающих на сборку деталей, получение пленок с минимальными внутренними напряжениями, а также строгое соблюдение всех технологических режимов изготовления. Для устранения возможного эффекта короткого замыкания необходимо контролировать напряженность электрического поля в емкостном зазоре.

## Заключение

Рассмотрены факторы, влияющие на процесс разрушения тонкой алюминиевой пленки, нанесенной на поверхность стеклянных деталей чувствительных элементов микромеханических датчиков. К таким причинам можно отнести наличие адсорбированной влаги на поверхности стеклянных деталей, наличие ионных загрязнений поверхности металлической пленки, приведшей к ее разрушению в процессе электростатического соединения. Стоит отметить, что образцы деталей, опи-

санных в работе, на практике встречаются крайне редко. В данном случае можно лишь судить о единичных отклонениях от технологии изготовления, что не позволяет в полной мере установить точные причины появления данных дефектов, а только выдвинуть гипотезы их появления.

#### Список литературы

1. Мокров Е. А., Папко А. А. Акселерометры НИИ Физических Измерений — элементы микросистемотехники // Микросистемная техника. 2002. № 1. С. 3—9.
2. Мокров Е. А. Интегральные датчики. Состояние разработок и производства. Направления развития, объемы рынка // Датчики и системы. 2000. № 1. С. 28—30.
3. Мандельброт Б. Б. Фракталы и хаос. Множество Мандельброта и другие чудеса. М.—Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика". 2009. 392 с.
4. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика". 2001. 528 с.
5. Шарайко М. П., Осокин А. Н. Быстродействующий алгоритм фрактального сжатия изображений // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318, № 5. С. 52—57.
6. Пронин И. А., Якушова Н. Д., Карманов А. А., Конова И. Е., Аверин И. А., Мошников В. А. Особенности золь-гель фрактальных нанообъектов, полученных при дополнительной операции закалки золя ниже температуры замедления // Нано- и микросистемная техника. 2016. Том 18, № 6. С. 339—345.
7. Аверин И. А., Мошников В. А., Пронин И. А. Особенности созревания и спиноподобного распада самоорганизующихся фрактальных систем // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 5 (142). С. 29—33.
8. Lublow M., Lewerenz H. J. Fractal Photocorrosion of Silicon Electrodes in Concentrated Ammonium Fluoride // Electrochemical and Solid-State Letters. 2007. N. 10 (8). P. 51—55.
9. Yu-Qun Hu, Ya-Pu Zhao, Tong-Xi Yu. Fractal Pattern Formation in Anodic Bonding of Pyrex Glass/Al/Si // International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation. 2008. N. 9 (4). P. 315—322.
10. Holten T., Jossang T., Meakin P., Feder J. Fractal characterization of two-dimensional aluminum corrosion fronts // Physical Review E. 1994. Vol. 50, N. 2. P. 754—759.
11. Mansouri H., Ibrik K., Bensalah N., Abdel-Wahab A. Anodic Dissolution of Pure Aluminum during Electrocoagulation Process: Influence of Supporting Electrolyte, Initial pH, and Current Density // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011. N. 50. P. 13362—13372.
12. Ficker T. Electrostatic discharges and multifractal analysis of their Lichtenberg figures // J. Phys. D.: Appl. Phys. 1999. N. 32. P. 219—226.
13. Li Bao, Jia Ma, Weimin Long, Peng He Ting Zhang and Nguyen V. Fractal analysis in particle dissolution: a review // Rev. Chem. Eng. 2014. N. 30 (3). P. 261—287.
14. Пауткин В. Е. Формообразование элементов МЭМС // Датчики и системы. 2018. № 8—9 (228). С. 56—61.
15. Козин С. А., Федулов А. В., Пауткин В. Е. Разработка технологии и специального оборудования для соединения кремния со стеклом в поле высокого напряжения // Датчики и системы. 2005. N. 9. С. 46—47.
16. Berthold A., Nicola L., Sarro P. M., Vellekoop M. J. Glass-to-glass anodic bonding with standard IC technology thin films as intermediate layers // Sensors and Actuators. 2000. N. 82. P. 224—228.
17. Li G. Y., Wang L. Influence of bonding parameters on electrostatic force in anodic wafer bonding // Thin Solid Films. 2004. N. 462—463. P. 334—338.
18. Thoma F., Goldschmidtboing F., Cobry Keith and Peter Woias. Stress-Free Bonding Technology with Pyrex for Highly Integrated 3D Fluidic Microsystems // Micromachines. 2014. N. 5. P. 783—796. Doi: 10.3390/mi5030783.
19. Takahashi Y. Two hundred years of Lichtenberg figures // Journal of Electrostatics. 1979. N. 6. P. 1—13.
20. Чернышев А. А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1988. 256 с.
21. Горлов М. И., Королев С. Ю. Физические основы надежности интегральных микросхем: Учеб. пособие. Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1995. 200 с.

---

V. E. Pautkin, Ph. D., Chief Specialist,  
JSC "SRIFM", Penza, 440026, Russian Federation, inercial@niifi.ru

*Corresponding author:*

Pautkin Valery E., Ph. D., Chief Specialist, Scientific Research Institute of Physical Measurements, Penza, 440026, Russian Federation, PVE1976@yandex.ru.

## Fractal Destruction of the Metallization During Assembly of the Micromechanical Sensitive Elements

*Received on March 19, 2019*

*Accepted on April 15, 2019*

*The authors considered the technological aspects connected with the destruction of the metal films of parts of the sensitive elements of the micromechanical accelerometers during their assembly. They determined the main reasons causing degradation of the metal films and proposed recommendations concerning elimination of this effect.*

**Keywords:** fractal, sensitive element, electrochemical corrosion, aluminum film, MEMS

For citation:

**Pautkin V. E.** Fractal Destruction of the Metallization During Assembly of the Micromechanical Sensitive Elements, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 9, pp. 527–533.

DOI: 10.17587/nmst.21.527-533

## Introduction

The micromechanical accelerometers based on the silicon MEMS technology find their applications in many industries — aircraft, motor industry, objects' control systems as the instruments for measuring of the tilt angles [1, 2]. The most important element of a micromechanical accelerometer of the capacitor type is the sensitive element, the technology of assembly of which is connected with production of a silicon crystal, glass parts and also their connection among themselves. Alongside with many well-developed manufacturing techniques, for example, deposition of the metallized platforms on the glass parts and assemblies of the sensitive elements, periodically, the deviations from the known technological processes do happen. For example, after the assembly of a sensitive element, almost a complete fracture of the metallization on the glass parts was observed. The nature of the destruction of the aluminum metallization was a dendritic fractal structure with a pronounced sign of self-similarity, i.e. in the process of increase of the size of the image the same "branches" of metallization only of the reduced sizes were observed. The above circumstance forced the authors of the work to investigate possible reasons for the specified deviations.

## Fractals in the equipment

The notion a fractal introduced in [3, 4] for description of the complex self-similar structures is widely applied in the technologies for description of various processes, for example in the field of computer information processing [5], in the field of receiving of nanosystems with new properties [6], synthesis of thin films by the method of zol-gel technology [7], etc.

Many researchers in their works observed fractal structures. For example, the silicon photoelectrodes placed in  $\text{NH}_4\text{F}$  solution demonstrated large-scale pictures of fractal etching at the anode potentials of about 6 V [8]. The formation of the fractal structures was controlled in the intermediate film of aluminum between the glass and the silicon at an electrostatic connection by the model of a two-dimensional diffusive-limited aggregation. At that, it was noted that the formation of a fractal structure could increase durability of the "silicon-glass" connection [9].

In [10] the process of corrosion of an aluminum foil in 1M solution of NaCl is described. In this case

the process of corrosion can be presented as the formation of a self-similar fractal geometry of aluminum. Also for the aluminum films it was demonstrated that the process of the anode dissolution of aluminum was influenced by such parameters as the initial state of the electrolyte, pH, and the current density. Presence of the ions of sodium shifted the corrosion potential towards the more cathodic potentials. The galvanostatic electrolysis demonstrated that the measured concentration of the aluminum exceeded the theoretical values calculated under the Faraday's law. Excess of the dissolved aluminum received during the galvanostatic electrolysis was primary due to the chemical dissolution of the aluminum in strong alkaline conditions [11].

The authors described the impact of voltage of about 8.5 kV on the surface of an electret of polyethylene terephthalate (PET-a) at various periods of influence. At that, the surface of PET-a was covered by lines of various dimensions [12]. The researchers also presented various models of a fractal dissolution of the substances [13]. From the submitted analysis it was visible that the formation and research of the fractal structures were of great importance in various spheres.

## Production of a sensitive element

Structurally a sensitive element (fig. 1) consisted of a crystal made of the silicon of high conductivity, for example of EKES or KDB brands, having orientation of the working plane (100). The crystal contained a mobile mass, which was rigidly fixed on an external frame by the elastic crosspieces. The mobile mass, the external frame, the elastic crosspieces were made in a uniform cycle according to the volume silicon MEMS technology by the method of the liquid anisotropic etching of silicon [14].

Two glass plates from the alkaline glass, for example, of LK-5, LK-105 brands, with the capacitor electrodes (thin films of metal, usually, aluminum) deposited on them, were located on both sides of the crystal. Metallization of both glass plates and the mobile mass of the crystal formed a differential condenser necessary for functioning of the device.

Considering the complexity of the micromechanical parts — silicon crystal, glass parts, and, which is especially important, the need for keeping of the exact capacitor gap between the parts — the mobile mass of the crystal and metallization of the glass plates (which can



be 8...30  $\mu\text{m}$ ), the assembly of the sensitive element is a critical technological operation.

Now the main way of connection of the silicon crystals and the glass parts of these designs is an electrostatic connection (ESC) also known as the anode welding [15—18]. Its features are the use of high temperatures for connection (350...450 °C) and the necessity to ensure a constant high voltage (400...500 V) in a certain polarity to the connected parts during the connection period of 10...15 min. These modes ensure obtaining of the micromechanical sensitive elements for creation of the devices with high metrological and operational characteristics.

However, with rare periodicity it is possible to observe the following appearance of the glass parts with the deposited metallization, as shown in fig. 2 (see the 4-th of cover).

At the same time, a destruction (not connection) of the sensitive element with a complete fracture of the metallization (about 1- $\mu\text{m}$  thick aluminum film) happened on one of the glass parts. The character of the destruction of the aluminum metallization had, as it was mentioned above, a dendritic fractal structure.

### **Hypotheses of the destruction of metallization**

*Electrical breakdown.* Such fractal lines are well-known from the literature sources and they are called Lichtenberg lines in honor of the scientist who discovered them [19]. These lines are formed on the non-conducting surfaces, glass, for example, and represent passage lines of the electric charges of high density. In this case we have a conductor (aluminum), although located on the glass. Besides, emergence of Lichtenberg lines can be connected with an electrical breakdown, which in the conditions of carrying out of ESC can be connected only with appearance of foreign conducting particles in the capacitor gap. Considering the voltage for carrying out of the process (about 400...500 V), the current during a short circuit (SC) can theoretically reach tens of amperes. The design of the installation for carrying out of the ESC process has a protection against the short circuits, and SC practically were not observed, which makes this version hardly probable.

*Electrochemical corrosion.* One of the main reasons for failures of the aluminum films in the integrated microcircuits is the aluminum's low corrosion resistance. The major factors accelerating the process of corrosion of the metallization, as a rule, are of an electrochemical character. They are such factors as availability of the adsorbed moisture, presence of an electric potential of

the metallization, an increased ambient temperature and ionic pollution. All the above factors increase the corrosion, accelerating the process of destruction of a metal film. It should be noted that the driving force of the process of the electrochemical corrosion is the external source of the current — the so-called electrolytic corrosion. Sodium ions are most detrimental for the aluminum films. Those films are most subjected to corrosion, which are under the negative potential, and this is the so-called cathodic corrosion [20]. A typical defect of the aluminum metallization is a break of the conducting paths, which unlike the copper ones, are prone to "the short circuits".

As is known, many oxides originally adsorb water in a motionless localized state at a temperature not above the room one, with formation of the hydrogen bonds of the adsorbed water molecules with the underlying hydroxyl groups. Such bonds are stable at temperatures of about 400 °C. After formation of the first, motionless adsorbed layer, the second, mobile layer is formed. Exactly these layers are responsible for migration of the ions between the electrodes [21]. Subsequently, an aluminum film can be deposited on these adsorbed layers. Besides, at the temperatures of carrying out of the ESC process in the glass, the sodium atoms are released which leads to the conditions for emergence of the electrolyte. Schematically this is presented in fig. 3.

Variation of the electrode potential is influenced by the geometrical factors of the design, in our case, of the sensitive element. In the narrow gaps, for example, for the sensitive element, this gap is the capacitor gap? the oxygen access is hindered, which results in a shift of the electrode potential to the negative side and emergence of the "open surface — slit" galvanic couple, where the slit is the anode and it corrodes actively (the so-called slit corrosion). It is also known that heating of the metal films and impact on them of the stretching mechanical stresses leads to a shift of its potential to the negative side. Thus, the heated or stretched sites of the metal films become the anodes in relation to the other sites of the films and are also exposed to an accelerated corrosion [21].

In case, when the considered sensitive element is at the same temperature, the presence of the considerable stretching stresses of the aluminum film deposited on the glass parts can also cause an accelerated corrosion (fig. 4, 5, see the 4-th of cover).

As it is apparent from the figures, both profilograms are characterized by a high thickness heterogeneity of the film with the sites of the gaps confirming its complete fracture.

## Preliminary conclusions

Considering the specific features of the design and the conditions for carrying out of the ESC process, namely:

- Presence of the ions of an alkaline metal (sodium) in the volume of the glass during carrying out of the ESC process;
- High temperatures of the connection of the silicon and glass parts;
- Small capacitor gap of the sensitive element;
- Malfunction of the installation in preventing a short circuit;
- Use of an aluminum film, unstable to the ions of sodium,

it is possible to draw a conclusion that exactly the electrochemical corrosion is the cause for destruction of a thin aluminum film under conditions of a possible stress of the aluminum film. In order to avoid this effect, it is necessary to ensure a careful chemical cleaning of the parts coming to the assembly, use of the films with the minimal internal stresses and also a strict observance of all the technological modes of production. For elimination of a possible effect of a short circuit it is necessary to control the electric field strength in the capacitor gap.

## Conclusion

The authors considered the factors influencing the process of destruction of the thin aluminum film deposited on the surface of the glass parts of the sensitive elements of the micromechanical sensors. Among such factors it is possible to mention the presence of the adsorbed moisture on the surfaces of the glass parts, ionic pollution of the surface of the metal film, which results in its destruction in the course of the electrostatic connection. It should be noted that the samples of the parts described in the work in practice are extremely hard to find. In the given case it is only possible to judge about certain deviations from the manufacturing technologies, which do not allow us to establish the exact reasons for emergence of these defects, but only to advance the hypotheses concerning their emergence.

## References

1. **Mokrov Ye. A., Papko A. A.** Akselerometry NII Fizicheskikh Izmereniy — elementy mikrosistemotekhniki, *Mikrosistemnaya tekhnika*, 2002, no. 1, pp. 3—9 (in Russian).
2. **Mokrov Ye. A.** Integral'nyye datchiki. Sostoyaniye razrabotki i proizvodstva. Napravleniya razvitiya, ob'yemy rynka, *Datchiki i sistemy*, 2000, no. 1, pp. 28—30 (in Russian).
3. **Mandel'brot B. B.** Fraktaly i khaos. Mnozhestvo Mandel'brot'a i drugie chudesya, Moscow, Izhevsk: NITS Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika, 2009, 392 p. (in Russian).

4. **Shreder M.** *Fraktaly, khaos, stepennyye zakony. Miniatury iz beskonechnogo raya*. Izhevsk: NITS Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika, 2001, 528 p. (in Russian).

5. **Sharabayko M. P., Osokin A. N.** Bystrodeystvuyushchiy algoritm fraktal'nogo szhatiya izobrazheniy, *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 318, no. 5, pp. 52—57. (in Russian).

6. **Pronin I. A., Yakushova N. D., Karmanov A. A., Kononova I. Ye., Averin I. A., Moshnikov V. A.** Osobennosti zol'-gel' fraktal'nykh nanoob'yektov, poluchennykh pri dopolnitel'noy operatsii zakalki zolya nizhe temperatury zamerzaniya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 6, pp. 339—345 (in Russian).

7. **Averin I. A., Moshnikov V. A., Pronin I. A.** Osobennosti sozrevaniya i spinodal'nogo raspada samoorganizuyushchikhsya fraktal'nykh sistem, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 5 (142), pp. 29—33 (in Russian).

8. **Lublow M., Lewerenz H. J.** Fractal Photocorrosion of Silicon Electrodes in Concentrated Ammonium Fluoride, *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2007, no. 10 (8), pp. 51—55.

9. **Yu-Qun Hu, Ya-Pu Zhao, Tong-Xi Yu.** Fractal Pattern Formation in Anodic Bonding of Pyrex Glass/Al/Si, *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2008, no. 9 (4), pp. 315—322.

10. **Holten T., Jossang T., Meakin P., Feder J.** Fractal characterization of two-dimensional aluminum corrosion fronts, *Physical Review E*, 1994, vol. 50, no. 2, pp. 754—759.

11. **Mansouri H., Ibrik K., Bensalah N., Abdel-Wahab A.** Anodic Dissolution of Pure Aluminum during Electrocoagulation Process: Influence of Supporting Electrolyte, Initial pH, and Current Density / Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011, no. 50, pp. 13362—13372.

12. **Ficker T.** Electrostatic discharges and multifractal analysis of their Lichtenberg figures, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1999, no. 32, pp. 219—226.

13. **Li Bao, Jia Ma, Weimin Long, Peng He Ting, Zhang, Nguyen V.** Fractal analysis in particle dissolution: a review, *Rev. Chem. Eng.*, 2014, no. 30 (3), pp. 261—287.

14. **Pautkin V. Ye.** Formoobrazovaniye elementov MEMS, *Datchiki i sistemy*, 2018, no. 8—9 (228), pp. 56—61 (in Russian).

15. **Kozin S. A., Fedulov A. V., Pautkin V. Ye.** Razrabotka tekhnologii i spetsial'nogo oborudovaniya dlya soyedineniya kremniya so steklom v pole vysokogo napryazheniya, *Datchiki i sistemy*, 2005, no. 9, pp. 46—47. (in Russian).

16. **Berthold A., Nicola L., Sarro P. M., Vellekoop M. J.** Glass-to-glass anodic bonding with standard IC technology thin films as intermediate layers, *Sensors and Actuators*, 2000, no. 82, pp. 224—228.

17. **Li G. Y., Wang L.** Influence of bonding parameters on electrostatic force in anodic wafer bonding, *Thin Solid Films*, 2004, no. 462—463, pp. 334—338.

18. **Thoma F., Goldschmidtboing F., Cobry K., Woias P.** Stress-Free Bonding Technology with Pyrex for Highly Integrated 3D Fluidic Microsystems, *Micromachines*, 2014, no. 5, pp. 783—796. DOI: 10.3390/mi5030783.

19. **Takahashi Y.** Two hundred years of Lichtenberg figures, *Journal of Electrostatics*, 1979, no. 6, pp. 1—13.

20. **Chernyshev A. A.** Osnovy nadezhnosti poluprovodnikovyykh priborov i integral'nykh mikroskhem, Moscow, Radio i svyaz', 1988. 256 p. (in Russian).

21. **Gorlov M. I., Korolev S. Yu.** Fizicheskiye osnovy nadezhnosti integral'nykh mikroskhem: Uchebnoye posobiye. Voronezh, Izdatel'stvo Voronezhskogo universiteta, 1995. 200 p. (in Russian).

**К. Э. Ангарита Лорес**, аспирант, loresruizlozano@gmail.com, **Е. В. Богатиков**, канд. физ.-мат. наук, доц., evbogatikov@yandex.ru, **Е. Н. Бормонтов**, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф., me144@phys.vsu.ru, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный университет", г. Воронеж

## СМЕСИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД МИКРОФЛЮИДНОГО ЧИПА С ТОПОЛОГИЕЙ ДИАГРАММЫ ВОРОНОГО

Поступила в редакцию 22.04.2019

*Методом лазерной микрообработки полиметилметакрилата изготовлены смесительные каскады микрофлюидного чипа, имитирующие систему жилкования листовой пластинки. Проведены исследования эффективности смешения двух реагентов для различных форм смесительных каскадов и чисел Рейнольдса. Показана высокая эффективность смешения предложенных каскадов по сравнению с каскадами, имеющими Y-топологию.*

**Ключевые слова:** микрофлюидный чип, смесительный каскад, лазерная микрообработка, диаграмма Вороного

### Введение

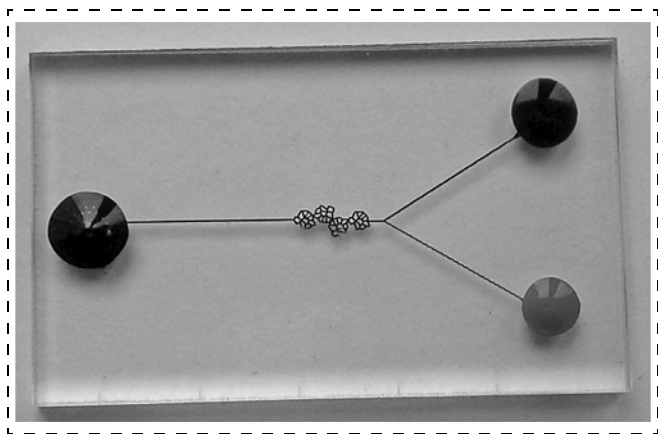
Так называемые лаборатории-на-чипе — одно из перспективных направлений современной микросистемной техники, которое находит широкое применение в биотехнологиях, медицине, химии [1–4]. Важной составляющей лаборатории-на-чипе является смесительный каскад — система микро- и наноканалов такой формы, которая обеспечивает эффективное смешение реагентов [5]. Диаметр таких каналов обычно не превышает 100...200 мкм, что приводит к значениям числа Рейнольдса ниже критического значения перехода от ламинарного к турбулентному течению. Как результат, в каналах простой формы наблюдается крайне медленное смешение за счет диффузии, что часто является неприемлемым. В настоящее время существуют два основных направления решения данной проблемы. Первое направление — это разработка активных смешивающих каскадов, в которых для перемешивания задействуются различные типы актюаторов: магнитные, пьезоэлектрические, ультразвуковые и т. д. [6]. Второе направление — это использование каналов сложной формы, содержащей, например, фрактальные участки [7], петли обратной связи [8] или просто многократные изменения направления потока или пересечения каналов [9].

Несмотря на довольно большое число различных реализаций смесительных каскадов, высокая эффективность смешивания часто сопровождается сложностью изготовления и высокой стоимостью. В то же время микрофлюидные чипы со смесительными каскадами часто являются одноразовым расходным материалом [10]. Поэтому при разработке смесительного каскада в настоящей работе главной задачей было сочетание высокой эффективности смешивания и простой технологической реализации методом лазерной микрообработки.

### Топология смесительных каскадов и методика эксперимента

За основу топологии смесительного каскада была выбрана форма сетчатого жилкования листовой пластины как пример природной системы, обеспечивающей транспортировку и смешивание жидкостей. Математически такая топология представляет собой диаграмму Вороного и может быть воспроизведена, например, с помощью алгоритма Форчуна [11].

С использованием лазерной микрообработки на поверхности пластины полиметилметакрилата (ПММА) были изготовлены смесительные каналы с шириной и глубиной ~100...125 мкм. Готовый чип получался сращиванием методом термическо-



**Рис. 1. Смесительный каскад микрофлюидного чипа**  
*Fig. 1. Micromixer for a microfluidic chip*

го связывания пластины ПММА, содержащей смесительные каналы, и пластины ПММА, содержащей входные и выходные отверстия (рис. 1).

Были разработаны и изготовлены чипы со смесительными каскадами трех различных топологий (рис. 2). Первая топология является гибридной — отдельные небольшие ее участки сформированы по принципу диаграмм Вороного и призваны обеспечить случайность точек и углов смешивания, а точки последовательного соединения таких участков позволяют задавать строго определенный угол смешивания (рис. 2, *a*). Характерные размеры ячеек диаграммы Вороного в данной топологии сопоставимы с шириной канала, что должно обеспечивать высокую эффективность расщепления ламинарных потоков жидкости. Недостатком данной топологии является ее низкая технологичность вследствие наличия слишком мелких деталей. Вторая топология полностью основана на построении диаграммы Вороного для случайно распределенных в пространстве точек (рис. 2, *b*) и имеет существенно больший размер ячеек для повышения процента выхода годных чипов. Для сохранения эффективности смешения в данной топологии используется большее число ячеек. В качестве образца сравнения использовалась простая Y-топология (рис. 2, *c*).

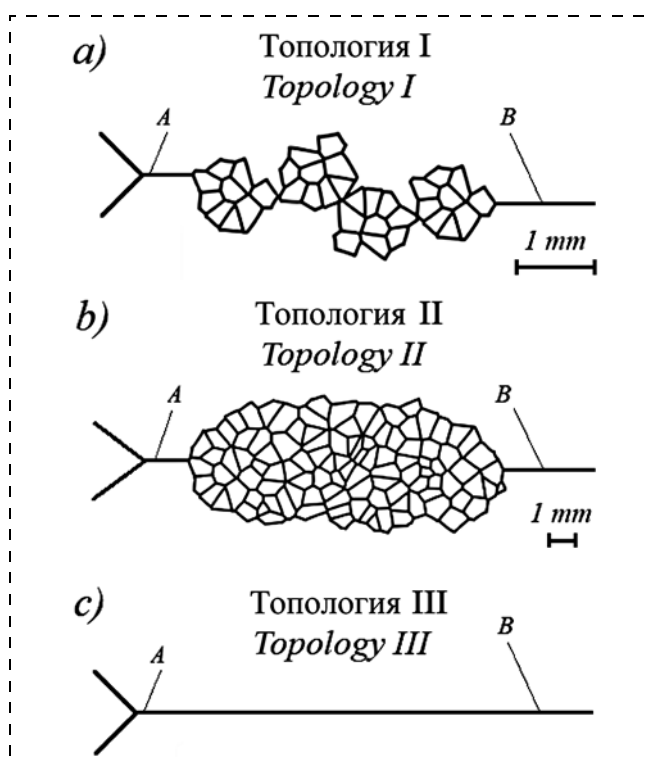
Для сравнения эффективности предложенных топологий смесительных каскадов была собрана установка, состоящая из шприцевого насоса, микрофлюидных чипов и микроскопа с цифровой камерой. Шприцевой насос [12] позволял контролировать объем и скорость подачи в микрофлюидный чип двух реагентов, в качестве которых использовались чернила контрастных цветов. Наилучшие результаты при цифровой обработке были получены при использовании красных и синих чернил.

Цифровые фотографии имели разрешение  $1280 \times 1024$  точек при увеличении микроскопа  $\times 100$ . На фотографиях автоматически выделялись

входные участки каналов (точки *A* на рис. 2) и выходные участки (точки *B* на рис. 2). Также в качестве эталона полного смешивания использовалась фотография однородной смеси чернил в канале микрофлюидного чипа.

Цифровую обработку фотографий проводили двумя способами. Для визуального контроля качества смешивания использовали построение диаграммы цветности в цветовом пространстве YCbCr, для которого неоднородность освещенности в поле зрения микроскопа оказывала минимальное влияние. Так как при цифровой регистрации использовалась камера, оптимизирующая цветовое восприятие для человеческого глаза, то количественную оценку степени смешения реагентов проводили на основе стандартной метрики цветовой разности CIEDE2000 [13]. Данная метрика определяет цветное расстояние между двумя точками в цветовом пространстве LCH и используется при оценке различий между изображениями (например, при сравнении алгоритмов сжатия изображений).

Обработке было подвергнуто 1260 изображений, полученных при 14 различных скоростях смешивания, которые обеспечивали изменение числа Рейнольдса в диапазоне  $\sim 7 \dots 43$ , что в условиях Y-топологии обеспечивает режим ламинарного течения.



**Рис. 2. Топологии смесительных каскадов:** *a* — в виде последовательного соединения нескольких участков диаграммы Вороного; *b* — на основе диаграммы Вороного; *c* — Y-топология  
*Fig. 2. Topologies of the micromixers: a — in the form of a serial connection of several sections of the Voronoi diagram; b — based on the Voronoi diagram; c — Y-topology*



## Результаты эксперимента

Визуальное сравнение результатов смешения показывает, что при использовании Y-топологии на диаграмме цветности, соответствующей выходу каскада, появляется дополнительная область (см. рис. 3, *b*), что означает появление на фотографии нового цвета, которого не было на фотографии входа каскада (см. рис. 3, *a*). Данный цвет соответствует области диффузионного смешения реагентов. При этом степень смешения остается низкой, так как на диаграмме цветности остаются протяженные области, соответствующие исходным цветам.

При использовании смесительных каскадов с топологией диаграммы Вороного диаграмма цветности становится существенно более компактной (рис. 3, *c, d*), что означает исчезновение исходных цветов и преобладание нового цвета, соответствующего смеси чернил.

Для количественной оценки эффективности смешения использовался коэффициент смешения:

$$I_m = 1 - \frac{(\langle \Delta E_{00}^* \rangle - \langle \Delta E_{00\min}^* \rangle)^2}{(\langle \Delta E_{00\max}^* \rangle - \langle \Delta E_{00\min}^* \rangle)^2},$$

где

$\langle \Delta E_{00}^* \rangle$  — среднее цветовое расстояние между точками фотографии выхода смесительного каскада и фотографии однородной смеси чернил;

$\langle \Delta E_{00\max}^* \rangle$  — среднее цветовое расстояние между точками фотографии на входе смесительного каскада и фотографии однородной смеси чернил;

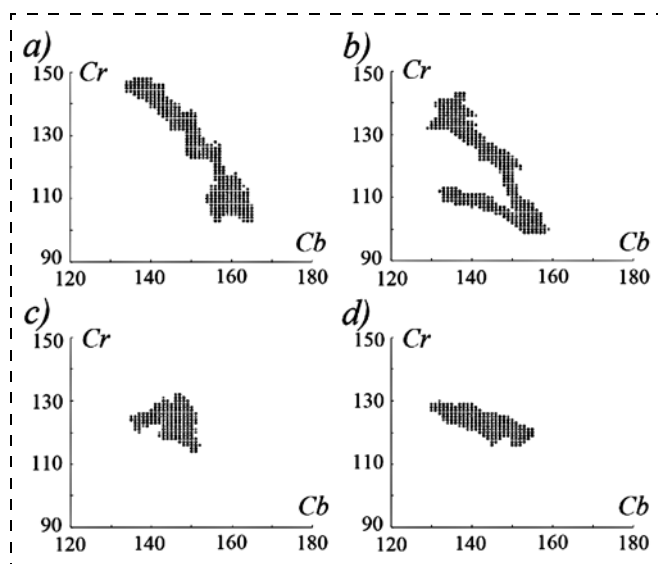


Рис. 3. Микрофотографии процесса смешения в цветовом пространстве YCbCr (проекция на плоскость CbCr): *a* — в точке A; *b* — в точке B топологии III; *c* — в точке B топологии I; *d* — в точке B топологии II

Fig. 3. Micrographs of the mixing process in the YCbCr color space (projection on the CbCr plane): *a* — at point A; *b* — at point B of topology III; *c* — at point B of topology I; *d* — at point B of topology II

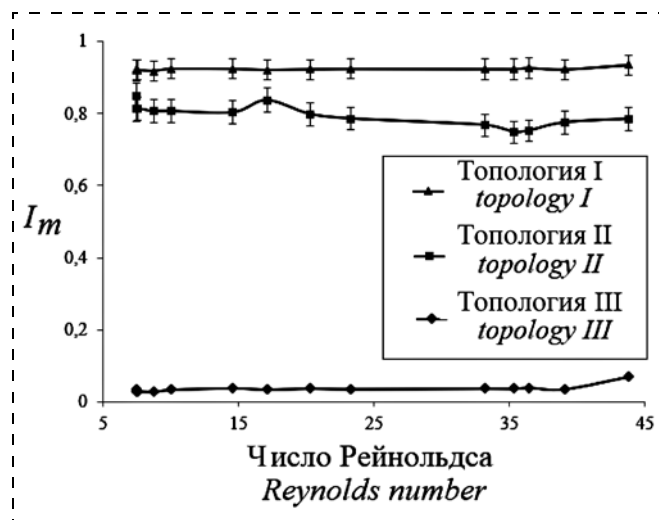


Рис. 4. Влияние числа Рейнольдса на эффективность смешения для разных топологий смесительных каскадов

Fig. 4. The influence of the Reynolds number on the mixing efficiency for different topologies of mixing cascades

$\langle \Delta E_{00\min}^* \rangle$  — среднее цветовое расстояние между точками различных фотографий однородной смеси чернил, которое определяет систематическую погрешность цифровой камеры при воспроизведении одинаковых изображений, а также колебания освещенности микроскопа.

Количественная оценка на основе метрики CIEDE2000 показывает наибольшую эффективность смешения при использовании гибридной топологии I (рис. 4). Это обусловлено тем, что ячейки диаграммы Вороного можно рассматривать как препятствия на пути потока, сопоставимые по размерам с шириной канала [14].

При увеличении размеров ячеек (топология II) эффективность смешения несколько падает, однако благодаря случайному расположению точек расщепления потока остается достаточно высокой (~80%). При этом повышение числа Рейнольдса сопровождается некоторым снижением эффективности смешения в случае топологии II. Причина заключается в том, что смешение идет в ламинарном режиме с многократным расщеплением исходных потоков, в результате чего на выходе формируется многослойное течение. Смешение между слоями осуществляется преимущественно за счет диффузии. При этом форма смесительного каскада обеспечивает эффективное расщепление потока уже при низких скоростях потока, тогда как рост скорости потока несколько снижает эффективность диффузионного смешивания.

## Заключение

Предложенные топологии смесительных каскадов на основе диаграмм Вороного просты в изготовлении и обеспечивают высокую эффективность

смешения (~80...95 %). Так как механизмом смешения является многократное расщепление ламинарных потоков с последующим диффузионным смешиванием многослойного потока, эффективность смешения почти не зависит от скорости течения и на нее не влияет переход между ламинарным и турбулентными режимами течения. Это позволяет использовать предложенные смесительные каскады в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

#### Список литературы

1. Cagnin S., Cimetta E., Guiducci C. et al. Overview of Micro- and Nano-Technology Tools for Stem Cell Applications: Micropatterned and Microelectronic Devices // Sensors. 2012. Vol. 12. P. 15947—15982.
2. Schapper D., Alam M. N., Szita N. et al. Application of microreactors in fermentation process development: a review // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2009. Vol. 395. P. 679—695.
3. Евстратов А. А. Микрофлюидные чипы для биологических и медицинских исследований // Российский химический журнал. 2011. № 2. С. 99—110.
4. Зими́на Т. М., Лучинин В. В., Крапивина Е. В., Ресин А. С. Микросистемная техника и проблемы биомедицинского анализа. Часть 1. Основные классы микроаналитических систем // Нано- и микросистемная техника. 2000. № 2. С. 37—42.

5. Родченкова В., Шахнович И. Микрофлюидные чипы — конструктор для разработчика. Решения компании Dolyte // Аналитика. 2017. № 3. С. 60—69.
6. Cai G., Xue L., Zhang H. A Review on Micromixers // Micromachines. 2017. Vol. 8. № 9. P. 274.
7. Bahadorimehr A., Damghanian M., Majlisc B. Y. A Static Micromixer Inspired from Fractal-Like Natural flow System // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 254. P. 25—28.
8. Dennai B., Khelfaoui R., Bentaleb A., Maazouzi A. Micromixer: Alternative passive solution with injection amplification system // Proceedings of the 9th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. 2011.
9. Suh Y. K., Kang S. A Review on Mixing in Microfluidics // Micromachines. 2010. № 1. P. 82—111.
10. Schapper D., Stocks S. M., Szita N. et al. Development of a single-use microreactor for cultivation of microorganisms // Chemical Engineering Journal. 2010. Vol. 160. P. 891—898.
11. Fortune S. A sweepline algorithm for Voronoi Diagrams // Algorithmica. 1987. № 2. P. 153—174.
12. Ангарита Лорес К. Э., Калинина К. А., Богатиков Е. В. Автоматический дозатор для микробиореактора // Твердотельная электроника, микроэлектроника и наноэлектроника: межвузовский сборник научных трудов. Воронеж: Изд-во ВГТУ. 2018. С. 93—95.
13. Sharma G., Wu W., Dalal E. N. The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations // Color Research and Application. 2005. Vol. 30, № 1. P. 21—30.
14. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Гаврилов А. А., Декте-рев А. А. Моделирование течений в микромиксерах // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 4. С. 601—612.

---

**С. Е. Ангарита Лорес**, Postgraduate, loresruizlozano@gmail.com, **Е. В. Богатиков**, Ph. D., Associate Professor, evbogatikov@yandex.ru, **Е. Н. Бормонтов**, D. Sc., Chief of Chair, me144@phys.vsu.ru, Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russian Federation

Corresponding author:

**Angarita Lores Carlos Eduardo**, Postgraduate, Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russian Federation, loresruizlozano@gmail.com

## Micromixers for Microfluid Chips with the Topology of the Voronoi Diagram

Received on April 22, 2019

Accepted on May 20, 2019

*Micromixer for a microfluidic chip inspired from the leaf veins were made using laser micro-processing and thermal wafer bonding of polymethylmethacrylate. For generating the topology of microchannels, it was proposed to use the Fortune's algorithm, which implements the Voronoi diagram. Two different topologies are proposed. The first option is serial connection of 4 sections of Voronoi diagrams, each of which contained 9 cells. The cell sizes in this case were comparable to the width of the channel (~100...125 μm) to increase the efficiency of splitting the laminar fluid flow. The second option is a Voronoi diagram containing more than 100 cells with sizes much larger than the width of the channels to increase the number of suitable chips in the manufacture. A test bench has been developed, which includes a syringe pump, microfluidic chips, a microscope with a digital camera and software for micrographs processing. The efficiency of two reagents mixing for different forms of micromixers and Reynolds numbers has been studied. Contrast inks were used as reagents. To estimate the mixing efficiency based on the analysis of micrographs of the mixed inks in microchannels, it is proposed to use the CIEDE2000 color metric. For this, the color distance  $\Delta E_{00}^*$  in the LCH color space was calculated for the corresponding pairs of micrographs points, after which the averaging of the color distances was performed. Micrograph of mixed inks at the exit of the micromixer and a micrograph of the liquid in the channel, which was obtained by preliminary homogeneous mixing of the initial inks, were compared. As a control experiment, liquid mixing was used in a micromixer with a simple Y-topology. It is shown that micromixers based on Voronoi diagrams are easy to manufacture and provide high mixing efficiency (~80...95 %) compared to the micromixer with the Y-topology (~5 %). Since the mixing mechanism is multiple splitting of laminar flows followed by diffusion mixing of the multilayer flow, the mixing efficiency is almost independent of the flow rate of the reactants and is not affected by the transition between laminar and turbulent flow regimes. This allows the use of the proposed micromixers in a wide range of Reynolds numbers.*

**Keywords:** microfluidic chip, micromixer, laser microfabrication, Voronoi diagram

For citation:

Angarita Lores C. E., Bogatkov E. V., Bormontov E. N. Micromixers for Microfluid Chips with the Topology of the Voronoi Diagram, *Nano i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 9, pp. 534–539.

DOI: 10.17587/nmst.21.534-539

## Introduction

Laboratories on a chip is a promising direction in the modern microsystem technologies, which finds its applications in biotechnologies, medicine and chemistry [1–4]. An important component of the laboratory on a chip is a micromixer, a system of micro- and nanochannels of such a form, which ensures an effective mixing of the reagents [5]. The diameter of such channels usually does not exceed 100–200  $\mu\text{m}$ , which results in the values of Reynolds numbers below the critical value of transition from a laminar flow to a turbulent one. As a result, due to diffusion in the channels of a simple form an extremely slow mixing is observed, which is often unacceptable. There are two main ways to solve the problem. The first one is development of active micromixers, in which various types of actuators are involved, for hashing: the magnetic, piezoelectric, ultrasonic, etc. [6]. The second way is the use of the channels of a complex form containing, for example, the fractal sites [7], feedback loops [8] or just repeated changes of the direction of a flow or crossing of the channels [9].

Notwithstanding a big number of various realizations of the micromixers, a high efficiency of mixing is often accompanied by complexity and high cost of production. At the same time, the microfluid chips with the micromixers are often disposable, expendable materials [10]. Therefore, during development of the micromixer the main task of the given work was a combination of high efficiency of mixing and a simple technological realization by the method of laser microprocessing.

## Topology of the micromixers and technique of the experiment

As the basis for the topology of the micromixer, the form of a dictyodromous nervation of a sheet plate was selected as an example of a natural system ensuring transportation and mixing of liquids. Mathematically such topology represents the Voronoi diagram and can be reproduced, for example, by means of Fortune algorithm [11].

With the use of laser microprocessing on the surface of a plate of polymethyl methacrylate (PMMA) mixing channels were manufactured with the width and depth of  $\sim 100\dots 125 \mu\text{m}$ . A ready chip was obtained by merging by the method of thermal binding of a PMMA plate containing the mixing channels, and PMMA plate containing the input and output openings (fig. 1).

Chips with the micromixers of three various topologies (fig. 2) were developed and manufactured. The first topology is a hybrid one — its certain small sites were formed according to the principle of the Voronoi

diagram and expected to ensure randomness of the points and angles of mixing, while the points of the consecutive connection of such sites allowed us to set strictly a certain angle of mixing (fig. 2, *a*). The characteristic sizes of the cells of the Voronoi diagram in this topology are comparable with the width of the channel, which is to ensure high efficiency of splitting of the laminar flows of liquid. A drawback of this topology is its low technological efficiency owing to existence of too small parts. The second topology is completely based on construction of the Voronoi diagram for the points, randomly distributed in space (fig. 2, *b*) and it has a significantly bigger size of the cells for increasing of the percent of output of the suitable chips. For preservation of the efficiency of mixing in this topology a bigger number of cells is used. As an example for comparison, a simple *Y*-topology was used (fig. 2, *c*).

For comparison of the efficiency of the proposed topologies of the micromixers an installation was assembled consisting of a syringe pump, microfluid chips and a microscope with a digital camera. The syringe pump [12] made it possible to control the volume and the speed of supplying of two reagents into the microfluid chip, the role of which was played by the inks of the contrast colors. During the digital processing the best results were received with the use of red and blue inks.

The digital photos had the resolution of  $1280 \times 1024$  pixels with the microscope's magnification of  $\times 100$ . In the photos the input sites of the channels (points *A* in fig. 2) and the output sites (*B* points in fig. 2) were automatically marked out. Also, as a full mixing standard, a photo of a uniform mixture of the ink in the channel of the microfluid chip was used.

The digital processing of the photos was done by two methods. For a visual quality control of mixing, the chromaticity diagrams in the YCbCr color space were constructed, on which the heterogeneity of illumination in the sight of the microscope exerted the minimal impact. Since for the digital recording a camera was used, optimizing the color perception for a human eye, the quantitative assessment of the extent of mixing of the reagents was carried out on the basis of CIEDE2000 standard metrics of the color difference [13]. This metrics determines the color distance between two points in LCH color space and is used for assessment of the distinctions between images (for example, when comparing the algorithms of compression of images).

Some 1260 images received at 14 various speeds of mixing were subjected to processing (which ensured a variation of the Reynolds number within the range of  $\sim 7\dots 43$ , which in the conditions of *Y*-topology ensured the mode of a laminar current).

## Results of the experiment

A visual comparison of the results of mixing shows that when Y-topology was used, an additional area appeared on the chromaticity diagram corresponding to the cascade output (see fig. 3, *b*), which means emergence in the photo of a new color, which was not in the photo of the input cascade (see fig. 3, *a*). This color corresponded to the area of the diffusive mixing of the reagents. At the same time, the degree of mixing remained low, because on the chromaticity diagram there still were extended areas corresponding to the initial colors.

When the micromixers with the topology of the Voronoi diagram were used, the diagram of chromaticity became essentially more compact (fig. 3, *c*, *d*), which meant disappearance of the initial colors and prevalence of a new color corresponding to the ink mixture.

For a quantitative assessment of the efficiency of mixing, the mixing coefficient was used:

$$I_m = 1 - \frac{\sqrt{(\langle \Delta E_{00}^* \rangle - \langle \Delta E_{00\min}^* \rangle)^2}}{\sqrt{(\langle \Delta E_{00\max}^* \rangle - \langle \Delta E_{00\min}^* \rangle)^2}},$$

where

$\langle \Delta E_{00}^* \rangle$  — average color distance between the points of the photo of the output of the micromixer and the photo of the uniform ink mixture;

$\langle \Delta E_{00\max}^* \rangle$  — average color distance between the photo points at the input of the micromixer and the photo of the uniform ink mixture;

$\langle \Delta E_{00\min}^* \rangle$  — average color distance between the points of various photos of a uniform ink mixture, which determines a systematic error of the digital camera during reproduction of the identical images and also fluctuations of illumination of the microscope.

A quantitative assessment on the basis of CIEDE2000 metrics demonstrates the greatest efficiency of mixing when the hybrid topology I is used (fig. 4). This is explained by the fact that the cells of the Voronoi diagram can be considered as an obstacle to the flow comparable by their sizes with the width of the channel [14].

In case of an increase of the sizes of the cells (topology II) the efficiency of mixing decreases a little, however, due to a random arrangement of the points of the flow splitting remains rather high (~80 %). At that, an increase of the Reynolds number is accompanied by a certain decrease of the mixing efficiency in case of topology II. The reason is that mixing proceeds in the laminar mode with a repeated splitting of the initial flows, therefore, a multilayered current is formed at the output. Mixing between the layers is carried out mainly due to diffusion. At that, the form of the micromixer ensures an effective splitting of the flow already at low speeds of the flow, whereas the growth of the speed of the flow somewhat reduces the efficiency of the diffusion mixing.

## Conclusion

The proposed topology of the micromixers on the basis of the Voronoi diagram is technologically simple and it ensures a high efficiency of mixing (~80...95 %). Since the mechanism of mixing is a repeated splitting of the laminar flows with the subsequent diffusion mixing of the multilayered flow, the efficiency of mixing almost does not depend on the speed of a current and is not influenced by the transition from the laminar to the turbulent modes of the flow. This allows us to use the proposed micromixers within a wide range of the Reynolds numbers.

## References

1. **Cagnin S., Cimetta E., Guiducci C., Martini P., Lanfranchi G.** Overview of micro- and nano-technology tools for stem cell applications: micropatterned and microelectronic devices, *Sensors*, 2012, vol. 12, pp. 15947–15982.
2. **Schapper D., Alam M. N., Szita N., Eliasson Lantz A., Gernaey K. V.** Application of microbioreactors in fermentation process development: a review, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009, vol. 395, pp. 679–695.
3. **Evstrapov A. A.** Mikroflyuidnye chipy dlya biologicheskikh i medicinskih issledovaniy, *Rossiyskiy himicheskij zhurnal*, 2011, no. 2, pp. 99–110 (in Russian).
4. **Zimina T. M., Luchinin B. V., Krapivina E. V., Resin A. S.** Mikrosistemnaya tekhnika i problemy biomeditsinskogo analiza Chast 1. Osnovnye klassy mikroanaliticheskikh system, *Nano i mikrosistemnaya tekhnika*, 2000, no. 2, pp. 37–42 (in Russian).
5. **Rodchenkova V., Shahnovich I.** Mikroflyuidnye chipy — konstruktor dlya razrabotchika. Resheniya kompanii Dolomite, *Analiitika*, 2017, no. 3, pp. 60–69 (in Russian).
6. **Cai G., Xue L., Zhang H.** A Review on micromixers, *Micromachines*, 2017, vol. 8, no. 9, pp. 274–301.
7. **Bahadorimehr A., Damghanianb M., Majlisc B. Y.** A Static micromixer inspired from fractal-like natural flow system, *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 254, pp. 25–28.
8. **Dennai B., Khelifaoui R., Bentaleb A., Maazouzi A.** Micromixer: Alternative passive solution with injection amplification system, *Proceedings of the 9th International Conference on Nano-channels, Microchannels, and Minichannels*, 2011.
9. **Suh Y. K., Kang S.** A Review on mixing in microfluidics, *Micromachines*, 2010, no. 1, pp. 82–111.
10. **Schapper D., Stocks S. M., Szita N., Eliasson Lantz A., Gernaey K. V.** Development of a single-use microbioreactor for cultivation of microorganisms, *Chemical Engineering Journal*, 2010, vol. 160, pp. 891–898.
11. **Fortune S.** A sweepline algorithm for Voronoi Diagrams, *Algorithmica*, 1987, no. 2, pp. 153–174.
12. **Angarita Lores K. E., Kalinina K. A., Bogatkov E. V.** Avtomaticheskij dozator dlya microbioreaktora, *Tverdotel'naya elektronika mikroelektronika i nanoelektronika: mezhvuzovskij sbornik nauchnykh trudov, Voronezh, izdatelstvo VGTU*, 2018, pp. 93–95 (in Russian).
13. **Sharma G., Wu W., Dalal E. N.** The CIEDE2000 color-difference formula: implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations, *Color Research and Application*, 2005, vol. 30, no. 1, pp. 21–30.
14. **Rudyak V. Ya., Minakov A. V., Gavrilov A. A., Dekterev A. A.** Modelirovanie techeniy v mikromikserah, *Teplofizika i aehromekhanika*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 601–612 (in Russian).



К. С. Фомина, магистрант, А. В. Пилькевич, студент, В. Д. Садков, канд. техн. наук, доц., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева" (НГТУ), ktp@nntu.nnov.ru

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ ПЛНОЧНЫХ ЧИП-ЭЛЕМЕНТОВ ВЧ И СВЧ АТТЕНУАТОРОВ

Поступила в редакцию 13.05.2019

Предложены топологии плночных чип-элементов аттенуаторов для поверхностного монтажа на основе однородной и кусочно-однородной резистивных пленок. Такие топологии обеспечивают в малых габаритных размерах реализацию широкого диапазона ослаблений при снижении в среднем на 40 % максимальных значений градиента потенциала и плотности выделяющейся в резистивной пленке мощности по сравнению с типовыми топологиями.

**Ключевые слова:** резистивные плночные поглощающие элементы, чип-элементы, фиксированные аттенуаторы

### Введение

Широкополосные фиксированные аттенуаторы с плночными поглощающими элементами (ПЭ) широко используют в телевизионных, радиоприемных и измерительных системах [1–4]. ПЭ таких аттенуаторов выполняют, как правило, на основе распределенных резистивных структур, отличающихся от ПЭ с дискретными плночными резисторами (по П- или Т-схемам) повышенной широкополосностью, малой чувствительностью к точечным дефектам и неоднородностям, разбросу технологических параметров, большей надежностью и устойчивостью к импульсным и температурным воздействиям [5–15].

Известные топологии ПЭ на основе распределенных резистивных структур, разработанные ранее для коаксиальных и полосковых трактов, оказываются технологически сложными для построения малогабаритных ЧИП-аттенуаторов для поверх-

ностного монтажа, контакты которых должны располагаться на противоположных сторонах подложки и охватывать ее [16]. Подробно рассмотренная авторами ранее [17] топология ПЭ для поверхностного монтажа (рис. 1, а) нуждается в оптимизации не только для обеспечения более равномерного распределения выделяющейся в пленке мощности, но и реализации всего требуемого диапазона ослаблений в малых габаритных размерах.

Цель работы — предложить топологии малогабаритных ПЭ широкого диапазона ослаблений с меньшими значениями градиентов потенциалов и плотностей мощности в резистивной пленке, оценить значение этого снижения и получить соотношения для расчета.

### Чип-элементы на основе однородной резистивной пленки

В работе [18] показано, что оптимальный профиль (профиль постоянного градиента потенциала) между контактами 1 и 3 ПЭ (рис. 1) близок к полуокружности, что обеспечивает и более равномерное распределение мощности. Предлагаемая топология приведена на рис. 1, б.

Результаты моделирования в отечественном программном комплексе *Elcut* [19] приведены на рис. 2 и показывают при обычно используемых отношениях  $0,1 < b/h < 0,3$  в квадратном ( $h/l = 2$ ) ПЭ снижение максимальной плотности мощности в 1,4 раза. При этом расчет можно проводить по методике [20], так как ослабление и входное сопротивление (рис. 3) меняются в пределах технологических погрешностей.

Для нормированного входного сопротивления  $R_{IN}$  и ослабления ПЭ  $q$  (рис. 1, б) с погрешнос-

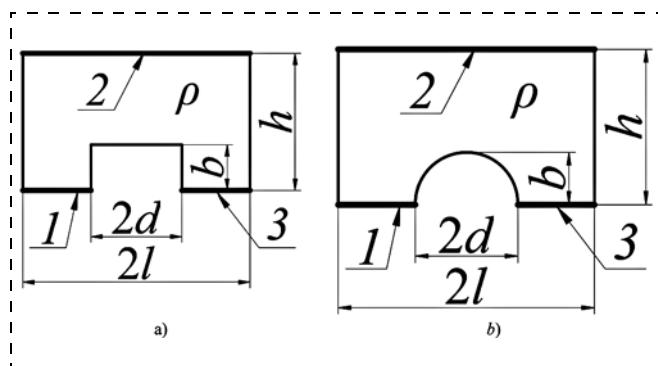


Рис. 1. Используемая (а) и предлагаемая (б) топологии ПЭ: 1, 2 и 3 — входной, заземленный и выходной контакты

Fig. 1. The presently used (a) and the proposed (b) topology of AE: 1, 2 and 3 — input, grounded and output contacts

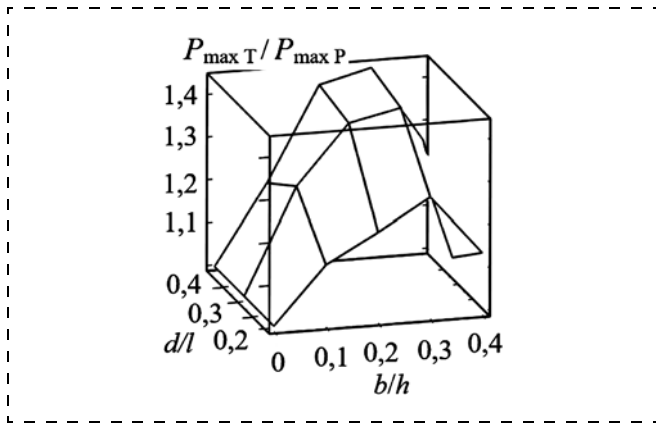


Рис. 2. Отношение максимальных значений плотности мощности тепловыделения ПЭ типовой (т) и предлагаемой (р) топологии при  $h/l = 2$

Fig. 2. Correlation of the maximal values of the density of power of the thermal emission of AE of the standard and of the proposed topology at  $h/l = 2$

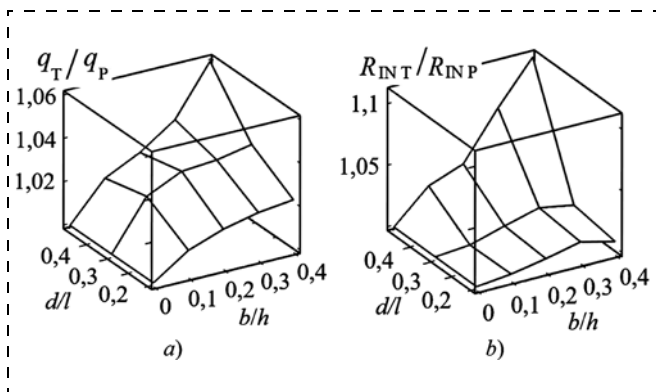


Рис. 3. Отношение ослаблений (а) и входных сопротивлений (б) ПЭ типовой и предлагаемой топологии при  $h/l = 2$

Fig. 3. Correlation of the attenuations (a) and the input resistances (b) of AE of the standard and the proposed topology at  $h/l = 2$

тью менее 3 % получаем расчетные соотношения ( $\alpha = d/l$ ,  $\beta = b/h$ ,  $\gamma = h/l$ ):

$$R_{IN}/\rho = A_R\alpha^2 + B_R\alpha + C_R;$$

$$A_R = D_R\beta^4 + E_R\beta^3 + F_R\beta^2 + G_R\beta + H_R,$$

$$B_R = J_R\beta^4 + I_R\beta^3 + L_R\beta^2 + K_R\beta + M_R;$$

$$C_R = N_R\beta^4 + O_R\beta^3 + P_R\beta^2 + R_R\beta + S_R;$$

$$D_R = -0,0083\gamma + 0,0041; \quad E_R = 0,1105\gamma - 0,0374;$$

$$F_R = -0,3359\gamma - 0,0465; \quad G_R = -0,0228\gamma + 0,6697;$$

$$H_R = -0,0195\gamma + 0,8967; \quad J_R = 0,0039\gamma - 0,0021;$$

$$I_R = -0,0515\gamma + 0,0212; \quad L_R = 0,1426\gamma + 0,0034;$$

$$K_R = 0,3245\gamma - 0,4611; \quad M_R = -0,1611\gamma + 0,0079;$$

$$N_R = -0,0003\gamma + 0,00002; \quad O_R = 0,0054\gamma + 0,0005;$$

$$P_R = -0,0311\gamma - 0,0077; \quad R_R = 0,1467\gamma + 0,0102;$$

$$S_R = 0,1399\gamma + 0,4662;$$

$$q = A_q\alpha^2 + B_q\alpha + C_q;$$

$$A_q = D_q\beta^4 + E_q\beta^3 + F_q\beta^2 + G_q\beta + H_q,$$

$$B_q = J_q\beta^4 + I_q\beta^3 + L_q\beta^2 + K_q\beta + M_q;$$

$$C_q = N_q\beta^4 + O_q\beta^3 + P_q\beta^2 + R_q\beta + S_q;$$

$$D_q = -0,0743\gamma + 0,0426, \quad E_q = 0,8828\gamma + 0,6287,$$

$$F_q = -3,2093\gamma - 5,5987, \quad G_q = 4,0882\gamma - 7,6476,$$

$$H_q = -3,9359\gamma + 40,5471, \quad J_q = 0,0608\gamma - 0,2281,$$

$$I_q = -0,7175\gamma + 2,1781, \quad L_q = 2,5281\gamma - 5,7427,$$

$$K_q = -2,6444\gamma + 13,4421, \quad M_q = 0,4313\gamma - 1,3742,$$

$$N_q = -0,0014\gamma - 0,0133, \quad O_q = 0,0073\gamma + 0,3141,$$

$$P_q = -0,0094\gamma - 1,6202, \quad R_q = -0,1216\gamma + 5,1781,$$

$$S_q = -1,0368\gamma + 13,6441.$$

#### Чип-элементы на основе кусочно-однородной резистивной пленки

ПЭ, показанные на рис. 1, обеспечивают при  $h/l = 2$  и  $0 \leq b/h \leq 0,6$  ослабления  $8 \leq q \leq 32$  дБ. Для реализации всего требуемого диапазона ослаблений (0,5...60 дБ) в малых габаритных размерах целесообразно использовать ПЭ на основе кусочно-однородных структур (рис. 4,  $c/h = 0,5$ ) с отношением удельных поверхностных сопротивлений  $\omega = \rho_2/\rho_1$ .

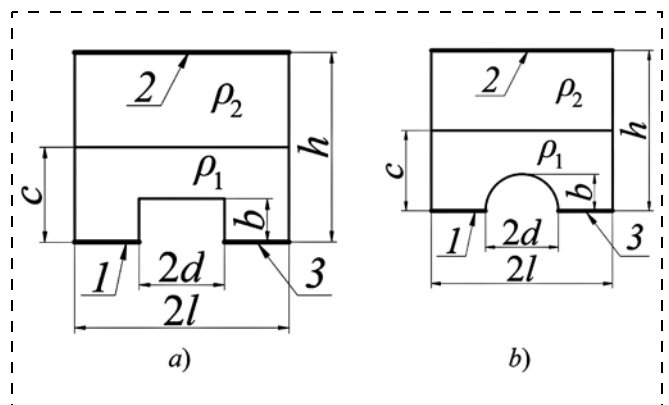


Рис. 4. Предлагаемые топологии ПЭ с прямоугольным (а) и скругленным (б) вырезами: 1, 2 и 3 — входной, заземленный и выходной контакты

Fig. 4. The proposed topologies of AE with the rectangular (a) and rounded (b) cuts: 1, 2 and 3 — input, grounded and output contacts

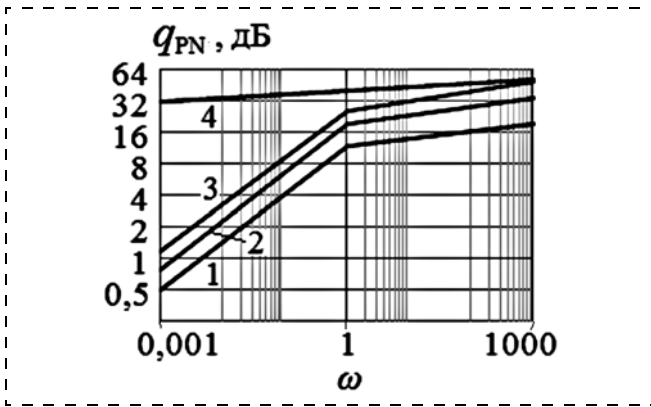


Рис. 5. Диапазон реализуемых ослаблений ПЭ (рис. 4, а) при  $c/h = 0,5$  и  $h/l = 2$

Fig. 5. Range of the realized attenuations of AE (fig. 4, a) at  $c/h = 0,5$  and  $h/l = 2$

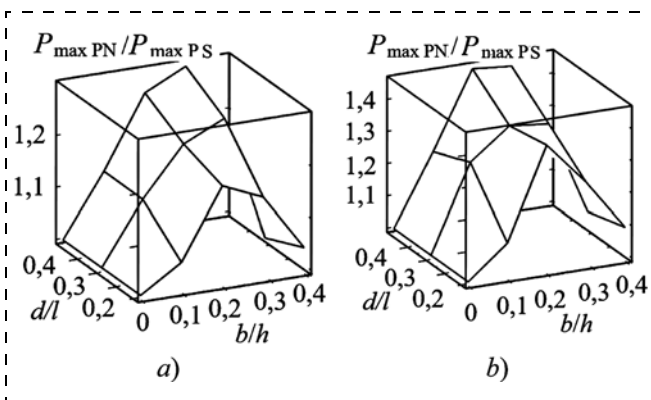


Рис. 6. Отношение максимальных плотностей мощности тепловыделения ПЭ рис. 4, а (PN) и рис. 4, б (PS) от  $b/h$  и  $d/l$  при  $\omega = 0,001$  (а) и  $\omega = 1000$  (б)

Fig. 6. Correlation of the maximal densities of power of the thermal emission of AE, fig. 4, a (PN) and fig. 4, b (PS) on  $b/h$  and  $d/l$  at  $\omega = 0,001$  (a) and  $\omega = 1000$  (b)

Диапазон реализуемых ослаблений ПЭ топологии рис. 4, а и отношение максимальных плотностей мощности тепловыделения приведено на рис. 5, 6.

Отметим, что отношение ослаблений ( $q_{PN}/q_{PS}$ ) и нормированных входных сопротивлений ( $R_{INPN}/R_{INPS}$ ) ПЭ (рис. 4) соответствуют по значениям и характеру зависимостям рис. 3.

Соотношения для вычисления ослабления и нормированного входного сопротивления ПЭ (рис. 4) с погрешностью менее 3 % приведены ниже ( $d/l = 0,5$ ,  $h/l = 2$ ,  $0 \leq b/h = \alpha \leq 0,8$ ,  $\omega = \rho_2/\rho_1$ ,  $\beta = \ln \omega$ ).

Для ПЭ на рис. 4, а получаем:

$$q_{PN} = -(9,98\beta + 0,67)\alpha^2 + (66,77\beta + 478,17)\alpha + (136,21\beta + 1039,09);$$

$$R_{INPN} = -(0,29\beta + 0,81)\alpha^2 + (1,94\beta + 29,12)\alpha + (6,07\beta + 70,77).$$

Для ПЭ на рис. 4, б:

$$q_{PS} = -(8,68\beta + 4,19)\alpha^2 + (57,15\beta + 443,01)\alpha + (138,59\beta + 1052,51);$$

$$R_{INPS} = -(0,28\beta + 0,09)\alpha^2 + (1,94\beta + 19,51)\alpha + (6,22\beta + 72,19).$$

Технологические вопросы построения ПЭ изложены в работе [21].

## Заключение

Предложены топологии малогабаритных чип-элементов ВЧ и СВЧ аттенуаторов для поверхностного монтажа на основе однородной и кусочно-однородной резистивной пленки, обеспечивающие реализацию широкого диапазона ослаблений при снижении в среднем на 40 % максимальных значений градиента потенциала и плотности выделяющейся в резистивной пленке мощности по сравнению с типовыми топологиями.

Результаты работы использованы при создании образцов тонкопленочных чип-аттенуаторов на подложке из поликора и нитрида алюминия размерами  $0,85 \times 0,85 \times 0,15$  мм диапазона 0,5...32 дБ.

## Список литературы

1. Кочемасов В., Белов Л. Аттенуаторы с ручным управлением — производители и характеристики // Электроника НТБ. 2017. № 3. С. 94—97.
2. Кочемасов В., Белов Л. Аттенуаторы с электронным управлением — производители и характеристики // Электроника НТБ. 2017. № 4. С. 82—95.
3. Кочемасов В., Белов Л. Фиксированные аттенуаторы — производители и характеристики. Ч. 1 // Электроника НТБ. 2017. № 6. С. 108—116.
4. Кочемасов В., Белов Л. Фиксированные аттенуаторы — производители и характеристики. Ч. 2 // Электроника НТБ. 2017. № 7. С. 90—94.
5. Львов А. Е., Рудоясова Л. Г., Шишков Г. И., Щербаков В. В. Тонкопленочные полосковые аттенуаторы // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2014. № 5. С. 40—46.
6. Шишков Г. И. Широкополосные фиксированные аттенуаторы // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2011. № 1. С. 110—114.
7. Савченко Е. М., Гладких М. В., Пронин А. А., Першин А. Д., Шишкунова Е. В. Пассивные СВЧ аттенуаторы фиксированного номинала на основе нитрида алюминия // Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC — 2012. Ч. 4. Москва, 2012. С. 103—106.
8. Савченко Е. М., Гладких М. В., Пронин А. А., Першин А. Д. Пассивные СВЧ аттенуаторы фиксированного номинала на основе кремния и арсенида галлия // Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC — 2013. Ч. 3. Москва, 2013. С. 41—44.
9. Гошин Г. Г., Екимов С. Ю., Семибратов В. П., Фатеев А. В. Анализ и моделирование сверхширокополосных фиксированных аттенуаторов СВЧ диапазона // Доклады

ТУСУРа. Декабрь 2011. № 2 (24). Ч. 1. Радиотехника, телекоммуникации, антенны, микроволновые устройства. С. 223—226.

10. **Бажилов В. А., Михалицын Е. А.** Проектирование малогабаритных аттенуаторов с малым уровнем ослабления // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17, № 1. С. 54—63.

11. **Rubanovich M., Khrustalev V., Aubakirov K., Razinkin V., Stolyarenko A., Bogomolov P.** Film attenuators new generation // American Journal of Scientific and Educational Research. 2014. N. 1 (4). P. 634—647.

12. **Богомолов П. Г., Рубанович М. Г., Хрусталева В. А., Разинкин В. П.** Широкополосный пленочный СВЧ аттенуатор // Электроника и микроэлектроника СВЧ: Матер. Всероссийской конф. Санкт-Петербург, 2014. С. 93—97.

13. **Qi Zhong, Xiaotong Liang, Zewen Liu.** Design of single thin film resistor network as 20 dB attenuator for DC-20 GHz application // Proc. of 16th International conference on electronic packaging technology. 2015. P. 297—300.

14. **Садков В. Д., Фомина К. С.** Поглощающие элементы для реализации широкого диапазона ослаблений // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 4. С. 238—243.

15. **Садков В. Д., Фомина К. С., Пилькевич А. В.** Поглощающие элементы на основе однородной резистивной

пленки для реализации широкого диапазона ослаблений мощности радиосигналов // Известия вузов. Электроника. 2018. № 5. С. 477—485.

16. **Чижиков С. В.** Анализ тенденций развития чип-резистивных СВЧ аттенуаторов // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 8. С. 36—42.

17. **Уткин В. Н., Садков В. Д., Якимов Д. Ю.** Расчет Т-образных поглощающих элементов чип-аттенуаторов для поверхностного монтажа // Известия вузов. Электроника. 2008. № 1. С. 86—88.

18. **Садков В. Д., Уткин В. Н.** Оптимальный профиль входных контактов аттенуаторной пластины на основе распределенных резистивных структур // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2008. № 12. С. 65—67.

19. **Программный комплекс Elcut.** Сайт компании ООО "Тор". URL: [www.tor.ru](http://www.tor.ru)

20. **Садков В. Д., Якимов Д. Ю.** Расчет П-образных поглощающих элементов чип-аттенуаторов для поверхностного монтажа // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2009. № 10. С. 76—80.

21. **Седаков А. Ю., Смолин В. К.** Тонкопленочные элементы в микроэлектронике: основы проектирования и изготовления. М.: Радиотехника, 2011. 168 с.

---

**K. S. Fomina**, Postgraduate, **A. V. Pilkevich**, Student, **V. D. Sadkov**, Ph. D., Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseyev (NGTU), [ktp@nntu.nnov.ru](mailto:ktp@nntu.nnov.ru), Nizhny Novgorod, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Sadkov Victor D.**, Ph. D., Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseyev (NGTU), [ktp@nntu.nnov.ru](mailto:ktp@nntu.nnov.ru)

## Optimization of the Topology of the Film Chip Elements of High Frequency and Microwave Attenuators

*Received on May 13, 2019*

*Accepted on June 10, 2019*

*The proposed topology-absorbing film chip components attenuators for surface mounting on the basis of homogeneous and piecewise-homogeneous resistive film different from the absorbing elements with discrete film resistors (for P- or T-schemes) high-output, low sensitivity to point defects and inhomogeneities, the scatter of technological parameters, greater reliability and resistance to impulse and thermal effects.*

*The proposed topologies provide implementation of a wide range of attenuations in small dimensions (from tenths of a decibel to tens of decibels) with an average reduction of 40 % of the maximum values of the potential gradient and the density of the power released in the resistive film compared to typical topologies.*

*The calculated ratios and graphs showing the gain in the value of the potential gradient and power density depending on the ratio of the size of the absorbing chip elements and the ratio of the resistances of the films used, as well as graphs of the ratios of attenuation and input resistances of chip elements of the model and the proposed topology.*

*The results of the work used in the creation of small-sized specimens of thin film chip attenuators on a substrate made of polikor and nitride of aluminium of between 0.5—32 dB. Results of work are used during creation of small-sized exemplars thin-film the chip attenuators on a substrate from a polybark and aluminum nitride of the range of 0.5...32 dB.*

**Keywords:** resistive film absorbing elements, chip elements, fixed attenuators

For citation:

Fomina K. S., Pilkevich A. V., Sadkov V. D. Optimization of the Topology of the Film Chip Elements of High Frequency and Microwave Attenuators, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 9, pp. 540–545.

DOI: 10.17587/nmst.21.540-545

## Introduction

The broadband fixed attenuators with the film absorbing elements (AE) are widely used in TV, radio-receiving and measuring systems [1–4]. As a rule, AE of such attenuators are made on the basis of the distributed resistive structures, different from AE with the discrete film resistors (P- or T-circuits) by a broader band, small sensitivity to dot defects and heterogeneities, spread of the technological parameters, higher reliability and resistance to the pulse and temperature influences [5–15].

The known topologies of AE on the basis of the distributed resistive structures, developed earlier for the coaxial and strip paths, turn out to be technologically complex for development of small-sized chip attenuators for the surface installation, the contacts of which should be on the opposite sides of a substrate and embrace it [16]. A similar topology of AE, considered by the authors in detail earlier [17] for a surface installation (fig. 1, *a*) needs optimization not only for a more uniform distribution of the power allocating in a film, but also for realization of all the required band of attenuations in small overall dimensions.

The aim of the work is to offer a topology of small-sized AE of a wide range of attenuations with smaller values of the gradients of potentials and densities of power in the resistive film, to estimate the value of this decrease and to receive the ratios calculation.

### Chip elements on the basis of a uniform resistive film

The work [18] demonstrated that the optimal profile (the profile of a constant gradient of potential) between contacts 1 and 3 of AE (fig. 1, *a*) was close to a semi-circle, which ensured also a more uniform distribution of power. The proposed topology is presented in fig. 1, *b*.

The results of modeling in Elcut domestic program complex [19] are presented in fig. 2 and demonstrate at usually used ratios of  $0.1 < b/h < 0.3$  in square ( $h/l = 2$ ) AE a 1.4 times decrease of the maximal density of power. At that, a calculation can be carried out according to the technique [20], since the attenuations and the input resistance (fig. 3) vary within the technological errors.

For a normalized input resistance  $R_{IN}$  and attenuation of AE  $q$  (fig. 1, *b*) with a margin error less than 3 % we get the following calculated ratios ( $\alpha = d/l$ ,  $\beta = b/h$ ,  $\gamma = h/l$ ):

$$R_{IN}/\rho = A_R\alpha^2 + B_R\alpha + C_R;$$

$$A_R = D_R\beta^4 + E_R\beta^3 + F_R\beta^2 + G_R\beta + H_R,$$

$$B_R = J_R\beta^4 + I_R\beta^3 + L_R\beta^2 + K_R\beta + M_R;$$

$$C_R = N_R\beta^4 + O_R\beta^3 + P_R\beta^2 + R_R\beta + S_R;$$

$$D_R = -0.0083\gamma + 0.0041; \quad E_R = 0.1105\gamma - 0.0374;$$

$$F_R = -0.3359\gamma - 0.0465; \quad G_R = -0.0228\gamma + 0.6697;$$

$$H_R = -0.0195\gamma + 0.8967; \quad J_R = 0.0039\gamma - 0.0021;$$

$$I_R = -0.0515\gamma + 0.0212; \quad L_R = 0.1426\gamma + 0.0034;$$

$$K_R = 0.3245\gamma - 0.4611; \quad M_R = -0.1611\gamma + 0.0079;$$

$$N_R = -0.0003\gamma + 0.00002; \quad O_R = 0.0054\gamma + 0.0005;$$

$$P_R = -0.0311\gamma - 0.0077; \quad R_R = 0.1467\gamma + 0.0102;$$

$$S_R = 0.1399\gamma + 0.4662;$$

$$q = A_q\alpha^2 + B_q\alpha + C_q;$$

$$A_q = D_q\beta^4 + E_q\beta^3 + F_q\beta^2 + G_q\beta + H_q,$$

$$B_q = J_q\beta^4 + I_q\beta^3 + L_q\beta^2 + K_q\beta + M_q;$$

$$C_q = N_q\beta^4 + O_q\beta^3 + P_q\beta^2 + R_q\beta + S_q;$$

$$D_q = -0.0743\gamma + 0.0426, \quad E_q = 0.8828\gamma + 0.6287,$$

$$F_q = -3.2093\gamma - 5.5987, \quad G_q = 4.0882\gamma - 7.6476,$$

$$H_q = -3.9359\gamma + 40.5471, \quad J_q = 0.0608\gamma - 0.2281,$$

$$I_q = -0.7175\gamma + 2.1781, \quad L_q = 2.5281\gamma - 5.7427,$$

$$K_q = -2.6444\gamma + 13.4421, \quad M_q = 0.4313\gamma - 1.3742,$$

$$N_q = -0.0014\gamma - 0.0133, \quad O_q = 0.0073\gamma + 0.3141,$$

$$P_q = -0.0094\gamma - 1.6202, \quad R_q = -0.1216\gamma + 5.1781,$$

$$S_q = -1.0368\gamma + 13.6441.$$

### Chip elements on the basis of a piecewise-uniform resistive film

AE (fig. 1) are ensured at  $h/l = 2$  and  $0 \leq b/h \leq 0.6$  attenuations of  $8 \leq q \leq 32$  dB. In small overall dimensions for realization of all the required range of attenuations (0.5...60 dB) it is expedient to use AE on the basis of the piecewise-uniform structures (fig. 4,  $c/h = 0.5$ ) with the correlation of the specific surface resistances of  $\omega = \rho_2/\rho_1$ .

Range of the realized attenuations of AE (fig. 4, *a*) and correlation of the maximal densities of power of the thermal emission is given in fig. 5, 6.

Let us note that the correlation of attenuations ( $(q_{PN}/q_{PS})$ ) and normalized input resistances ( $R_{INPN}/R_{INPS}$ ) of AE (fig. 4) correspond by their values and character to the dependences of fig. 3.

The ratios for calculation of the attenuations and normalized input resistance of AE (fig. 4) with a margin error less than 3 % are presented below ( $d/l = 0.5$ ,  $h/l = 2.0 \leq b/h = \alpha \leq 0.8$ ,  $\omega = \rho_2/\rho_1$ ,  $\beta = \ln\omega$ ).

For AE in fig. 4, *a* we get:

$$q_{PN} = -(9.98\beta + 0.67)\alpha^2 + (66.77\beta + 478.17)\alpha + (136.21\beta + 1039.09);$$

$$R_{INPN} = -(0.29\beta + 0.81)\alpha^2 + (1.94\beta + 29.12)\alpha + (6.07\beta + 70.77).$$

For AE in fig. 4, *b*:

$$q_{PS} = -(8.68\beta + 4.19)\alpha^2 + (57.15\beta + 443.01)\alpha + (138.59\beta + 1052.51);$$

$$R_{INPS} = -(0.28\beta + 0.09)\alpha^2 + (1.94\beta + 19.51)\alpha + (6.22\beta + 72.19).$$

The technological questions concerning construction of AE are presented in [21].

## Conclusion

The authors proposed the topologies for small-sized chip elements of high and microwave frequency attenuators for surface installation on the basis of a uniform and piecewise-uniform resistive film, ensuring realization of a wide range of attenuations at a decrease on average by 40 % of the maximal values of the gradient of potential and density of the power, allocating in the resistive film in comparison with the standard topologies.

The results of the work were used for development of the samples of thin-film chip attenuators on a substrate from polycore and aluminum nitride with the sizes of  $0.85 \times 0.85$  mm in the range of 0.5...32 dB.

## References

1. **Kochemasov V., Belov L.** Attenyuatory` s ruchny`m upravleniem — proizvoditeli i xarakteristiki, *E'lektronika NTB*, 2017, no. 3, pp. 94—97.
2. **Kochemasov V., Belov L.** Attenyuatory` s e'lektronny`m upravleniem — proizvoditeli i xarakteristiki, *E'lektronika NTB*, 2017, no. 4, pp. 82—95.
3. **Kochemasov V., Belov L.** Fiksirovanny`e attenyuatory` — proizvoditeli i kharakteristiki, ch. 1, *E'lektronika NTB*, 2017, no. 6, pp. 108—116.
4. **Kochemasov V., Belov L.** Fiksirovanny`e attenyuatory` — proizvoditeli i kharakteristiki, ch. 2, *E'lektronika NTB*, 2017, no. 7, pp. 90—94.

5. **L'vov A. E., Rudoyasova L. G., Shishkov G. I., Shherbakov V. V.** Tonkoplenochny`e poloskovy`e attenyuatory`, *Trudy` NGTU im. R. E. Alekseeva*, 2014, no. 5, pp. 40—46.
6. **Shishkov G. I.** Shirokopolosny`e fiksirovanny`e attenyuatory`, *Trudy` NGTU im. R. E. Alekseeva*, 2011, no. 1, pp. 110—114.
7. **Savchenko E. M., Gladkix M. V., Pronin A. A., Pershin A. D., Shishkunova E. V.** Passivny`e SVCh attenyuatory` fiksirovannogo nominala na osnove nitrida alyuminiya // *Materialy` Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii INTERMATIC — 2012*, ch. 4, Moscow, 2012, pp. 103—106.
8. **Savchenko E. M., Gladkix M. V., Pronin A. A., Pershin A. D.** Passivny`e SVCh attenyuatory` fiksirovannogo nominala na osnove kremniya i arsenida galliya // *Materialy` Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii INTERMATIC — 2013*, ch. 3, Moscow, 2013, pp. 41—44.
9. **Goshin G. G., Ekimov S. Yu., Semibratov V. P., Fateev A. V.** Analiz i modelirovanie sverxshirokopolosny`x fiksirovanny`x attenyuatorov SVCh-diapazona, *Doklady` TUSURa*, no. 2 (24), dekabr` 2011, ch. 1. *Radiotekhnika, telekommunikacii, anteny, mikrovolnovy`e ustrojstva*, pp. 223—226.
10. **Bazhilov V. A., Mixalicyn E. A.** Proektirovanie malogabaritny`x attenyuatorov s maly`m urovnem oslableniya, *Fizika volnovykh processov i radiotexnicheskie sistemy*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 54—63.
11. **Rubanovich M., Khrustalev V., Aubakirov K., Razinkin V., Stolyarenko A., Bogomolov P.** Film attenuators new generation, *American Journal of Scientific and Educational Research*, 2014, no. 1 (4), pp. 634—647.
12. **Bogomolov P. G., Rubanovich M. G., Xrustalev V. A., Razinkin V. P.** Shirokopolosny`j plyonochny`j SVCh attenyuator, *E'lektronika i mikroelektronika SVCh: Mater. Vserossijskoj konf.*, Sankt-Petersburg, 2014, pp. 93—97.
13. **Qi Zhong, Xiaotong Liang, Zewen Liu.** Design of single thin film resistor network as 20 dB attenuator for DC-20 GHz application, *Proc. 16th International conference on electronic packaging technology*, 2015, pp. 297—300.
14. **Sadkov V. D., Fomina K. S.** Pogloshhayushhie e`lementy` dlya realizacii shirokogo diapazona oslablenij, *Nano- i mikro-sistemnaya texnika*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 238—243.
15. **Sadkov V. D., Fomina K. S., Pil'kevich A. V.** Pogloshhayushhie e`lementy` na osnove odnorodnoj rezistivnoj plenki dlya realizacii shirokogo diapazona oslablenij moshhnosti radiosignalov, *Izvestiya vuzov. E'lektronika*, 2018, no. 5, pp. 477—485.
16. **Chizhikov S. V.** Analiz tendencij razvitiya chip-rezistivny`x SVCh attenyuatorov, *Uspekhi sovremennoj radioelektroniki*, 2017, no. 8, pp. 36—42.
17. **Utkin V. N., Sadkov V. D., Yakimov D. Yu.** Raschet T-obraznykh pogloshhayushhikh e`lementov chip-attenyuatorov dlya poverkhnostnogo montazha, *Izvestiya vuzov. E'lektronika*, 2008, no. 1, pp. 86—88.
18. **Sadkov V. D., Utkin V. N.** Optimal'nyj profil' vhodnyh kontaktov attenyuatornoj plastiny na osnove raspredelennyh rezistivnyh struktur, *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*, 2008, no. 12, pp. 65—67.
19. **Programmyj kompleks Elcut.** Sajt kompanii OOO "Tor", URL: [www.tor.ru](http://www.tor.ru)
20. **Sadkov V. D., Yakimov D. Yu.** Raschet P-obraznykh pogloshchayushchih ehlementov chip-attenyuatorov dlya poverkhnostnogo montazha, *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*, 2009, no. 10, pp. 76—80.
21. **Sedakov A. Yu., Smolin V. K.** Tonkoplenochnye ehlementy v mikroelektronike: osnovy proektirovaniya i izgotovleniya. Moscow, Radiotekhnika, 2011, 168 p.



**В. П. Драгунов**, д-р техн. наук, доц., нач. отд., drag@adm.nstu.ru, **Д. И. Остертак**, канд. техн. наук, доц., зав. каф., ostertak@ngs.ru, **Р. Е. Синицкий**, магистрант, sinitsky.rodion@yandex.ru, Новосибирский государственный технический университет

## АНАЛИЗ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА С ПЕРИОДИЧЕСКИМ ПОДКЛЮЧЕНИЕМ НАГРУЗКИ

Поступила в редакцию 13.06.2019

*Анализируется работа электростатического вибрационного микроэлектромеханического генератора на основе схемы дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором, содержащим встроенный заряд, и резистором нагрузки, периодически подключаемым параллельно накопительному конденсатору в фазе разряда переменного конденсатора. Показано, что подключение нагрузки  $R_{load}$  параллельно накопительному конденсатору может приводить к остановке неограниченного роста напряжений и зарядов даже при глубине модуляции емкости переменного конденсатора  $\eta \geq 2$ . Получены выражения для расчета основных параметров микрогенератора в режиме автостабилизации при  $R_{load} \neq \infty$ . Установлено, что режим автостабилизации при  $\eta \geq 2$  и заданном сопротивлении нагрузки наступает, только если глубина модуляции емкости  $\eta$  меньше некоторого критического значения  $\eta_{cr}$ , превышение которого ведет к возобновлению режима неограниченного монотонного роста напряжений и зарядов в схеме. Показано, что в отличие от случая с  $R_{load} = \infty$  при  $R_{load} \neq \infty$  в установившемся режиме автостабилизации изменения зарядов конденсаторов в исследуемой схеме не прекращаются, а стабилизируются.*

**Ключевые слова:** МЭМП, дубликатор Беннета, преобразование энергии, режим автостабилизации, микрогенератор, критические значения

### Введение

Как было отмечено в работах [1, 2], в настоящее время активно разрабатываются и исследуются новые виды автономных источников питания на основе микроэлектромеханических преобразователей (МЭМП) энергии, расположенных непосредственно на месте размещения автономных устройств, таких как, например, узлы беспроводных сенсорных сетей.

Чтобы передать электрическую энергию, полученную с помощью МЭМП, в нагрузку, преобразователь включают в состав соответствующих электрических схем (схем сопряжения) [3–7]. Такая система в целом представляет собой своеобразный микрогенератор (МГ).

Параметры МГ существенно зависят как от конструкции и характеристик МЭМП, так и от схемы сопряжения. Выбор схемы сопряжения на этапе проектирования МГ является важнейшей задачей.

Одними из наиболее перспективных схем сопряжения для электростатических МГ в настоящее время представляются схема дубликатора Беннета и ее модификации [8–14].

В работах [15, 16] проводился анализ схемы сопряжения на основе дубликатора Беннета с переменным конденсатором, содержащим встроенный заряд, что исключало необходимость сообщения начального заряда МЭМП, и было показано, что данная схема сохраняет работоспособность и при

глубине модуляции емкости переменного конденсатора меньше двух. Таким образом, на основе данной схемы сопряжения появилась возможность создавать МГ, работающие при малых амплитудах внешних механических колебаний.

Дальнейшие исследования этой схемы [1] показали, что подключение нагрузки параллельно накопительному конденсатору позволяет получать непрерывную генерацию тока в режиме автостабилизации.

В данной работе проводится анализ работы микрогенератора на основе модифицированной схемы дубликатора Беннета с переменным конденсатором, содержащим встроенный заряд, и дополнительным резистором в цепи накопительного конденсатора, периодически подключаемым параллельно накопительному конденсатору в фазе разряда переменного конденсатора.

### Модель

Электрическая схема микрогенератора на основе модифицированного дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором, содержащим встроенный заряд, и периодически подключаемой нагрузкой, представлена на рис. 1. Схема содержит переменный конденсатор  $C_{var}$  — МЭМП, два постоянных конденсатора:  $C_1$  (накопительный конденсатор) и  $C_2$ , а также четыре ключа  $Sw_1$ — $Sw_4$ . Для создания встроенного электрического поля в  $C_{var}$  используется электрет-диэлектрик со встроенным зарядом, расположенный на одном из элект-

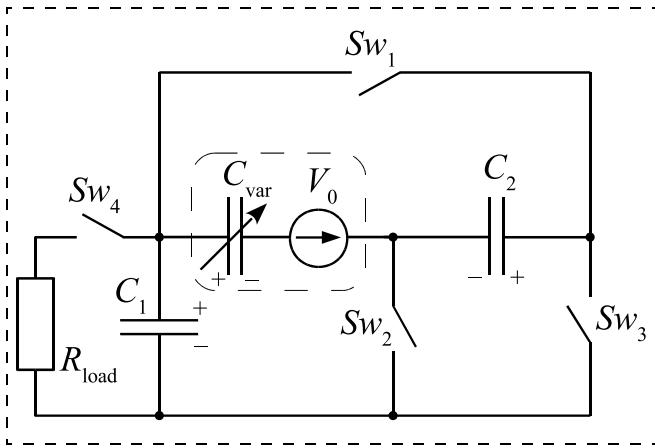


Рис. 1. Электрическая схема МГ с электретом

Fig. 1. Electret microgenerator electrical circuit

родов переменного конденсатора. Эквивалентная схема конденсатора с электретом представлена на рис. 1 модулем  $C_{var}$  и источником напряжения  $V_0$  в цепи переменного конденсатора. Нагрузка  $R_{load}$  подключена параллельно конденсатору  $C_1$  при замыкании ключа  $Sw_4$ .

Преобразование механической энергии в электрическую происходит при периодическом изменении емкости переменного конденсатора  $C_{var}$  под действием внешней механической силы от  $C_{max}$  до  $C_{min}$  и обратно.

Полный цикл преобразования энергии у данной схемы включает две чередующиеся фазы: фазу заряда и фазу разряда переменного конденсатора  $C_{var}$ . Сопротивление нагрузки  $R_{load}$  периодически подключается параллельно накопительному конденсатору  $C_1$  только в фазе разряда конденсатора  $C_{var}$ .

Анализ работы генератора проведем, полагая, что сопротивления ключей в разомкнутом состоянии равны бесконечности, а в замкнутом состоянии — несколькими десяткам ом. Фазу разряда  $C_{var}$  будем обозначать индексом  $n$ , а фазы заряда — индексами  $(n - 1)$  и  $(n + 1)$ .

В фазе заряда конденсатора  $C_{var}$ , когда его емкость увеличивается, ключ  $Sw_3$  размыкается, а ключи  $Sw_1$  и  $Sw_2$  замыкаются и по цепям  $V_0 \rightarrow C_2 \rightarrow Sw_1 \rightarrow C_{var}$  и  $V_0 \rightarrow Sw_2 \rightarrow C_1 \rightarrow C_{var}$  происходит подзаряд  $C_{var}$ . В конце фазы заряда  $C_{var}$ , когда  $C_{var} = C_{max}$ , напряжение на переменном конденсаторе принимает минимальное значение  $V_{min}$ . При этом

$$V_{min} = V_{C_1, char} + V_0 = V_{C_2, char} + V_0, \quad (1)$$

где  $V_{C_1, char}$  и  $V_{C_2, char}$  — напряжения на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$  в конце фазы заряда  $C_{var}$ .

В фазе разряда конденсатора  $C_{var}$ , когда его емкость уменьшается, ключи  $Sw_1$  и  $Sw_2$  размыкаются,

замыкаются ключи  $Sw_3$  и  $Sw_4$  и происходит разряд  $C_{var}$  по пути  $C_{var} \rightarrow (C_1, R_{load}) \rightarrow Sw_3 \rightarrow C_2 \rightarrow V_0$ . При этом в конце фазы разряда  $C_{var}$ , когда  $C_{var} = C_{min}$ , напряжение на переменном конденсаторе достигает максимального значения  $V_{max}$ . При этом

$$V_{min} = V_{C_1, dis} + V_{C_2, dis} + V_0, \quad (2)$$

где  $V_{C_1, dis}$  и  $V_{C_2, dis}$  — напряжения на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$  в конце фазы разряда  $C_{var}$ .

После этого цикл преобразования повторяется.

Анализ показывает, что в конце  $n$ -й фазы разряда  $C_{var}$  изменения зарядов конденсаторов  $C_{var}$  и  $C_2$

будут равны между собой:  $|\Delta q_{C_{var}}^{(n)}| = |\Delta q_{C_2}^{(n)}| = \Delta q^{(n)}$ ,

где

$$\Delta q^{(n)} = \left( \frac{1}{C_{min}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)^{-1} \times \left( \frac{q^{(n-1)}}{C_{min}} - \frac{q_{C_1}^{(n-1)}}{C_1} - \frac{q_{C_2}^{(n-1)}}{C_2} - V_0 + \frac{\Delta q_R^{(n)}}{C_1} \right), \quad (3)$$

здесь  $q^{(n-1)}$ ,  $q_{C_1}^{(n-1)}$  и  $q_{C_2}^{(n-1)}$  — заряды на конденсаторах  $C_{var}$ ,  $C_1$  и  $C_2$  в конце  $(n - 1)$ -й фазы заряда  $C_{var}$ , а  $\Delta q_R^{(n)}$  — количество заряда, прошедшего через сопротивление нагрузки за  $n$ -ю фазу разряда  $C_{var}$ .

В свою очередь, в конце  $(n + 1)$ -й фазы заряда  $C_{var}$  выражение для оценки изменения заряда на конденсаторе  $C_{var}$  принимает следующий вид:

$$\Delta q^{(n+1)} = \frac{C_{max}(C_1 + C_2)}{C_{max} + C_1 + C_2} \times \left( \frac{q_{C_2}^{(n)} + q_{C_1}^{(n)}}{C_1 + C_2} + V_0 - \frac{q^{(n)}}{C_{max}} \right), \quad (4)$$

где  $q^{(n)}$ ,  $q_{C_1}^{(n)}$  и  $q_{C_2}^{(n)}$  — заряды на конденсаторах  $C_{var}$ ,  $C_1$  и  $C_2$  в конце  $n$ -й фазы разряда  $C_{var}$ .

Учитывая (1) и (3), можно показать также, что изменение заряда на переменном конденсаторе в конце  $n$ -й фазы разряда  $C_{var}$  может быть представлено в виде

$$\Delta q^{(n)} = \frac{V_{min}^{(n-1)}(\eta - 2) + V_0 + \Delta q_R^{(n)}/C_1}{C_{min}^{-1} + C_1^{-1} + C_2^{-1}}, \quad (5)$$

где  $V_{min}^{(n-1)}$  — минимальное напряжение на конденсаторе  $C_{var}$  в конце  $(n - 1)$ -й фазы заряда, а

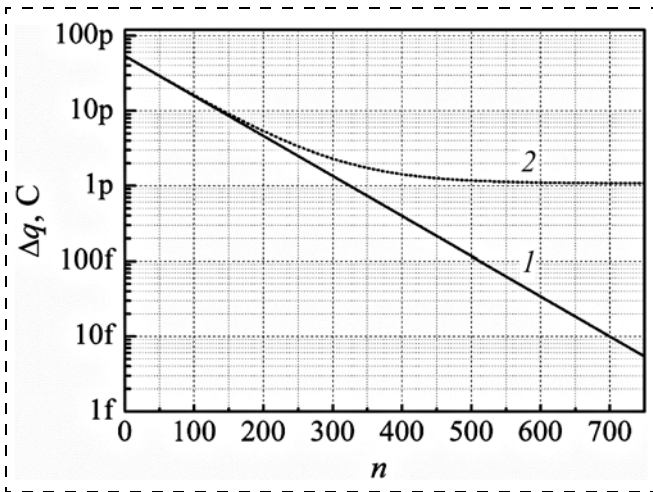


Рис. 2. Зависимости изменения приращения заряда на переменном конденсаторе  $C_{var}$  в фазе его заряда от числа циклов преобразования для  $\eta = 1,767$ : 1 —  $R_{load} = \infty$ ; 2 —  $R_{load} = 3 \cdot 10^{10}$  Ом  
 Fig. 2. Dependences of the change in the charge increment of the variable capacitor  $C_{var}$  in the phase of its charge on the number of conversion cycles for  $\eta = 1.767$ : 1 —  $R_{load} = \infty$ ; 2 —  $R_{load} = 3 \cdot 10^{10}$  Ω

$\eta = C_{max}/C_{min}$  — глубина модуляции емкости переменного конденсатора.

Из выражения (5) следует, что на начальном этапе работа механической силы всегда вызывает увеличение напряжения и заряда конденсаторов, однако процесс роста напряжения и заряда конденсаторов при разной глубине модуляции емкости может протекать по-разному.

При  $\eta < 2$  действие механической силы, хотя первоначально и вызывает увеличение заряда и напряжения на конденсаторах  $C_{var}$ ,  $C_1$  и  $C_2$ , но приращение заряда переменного конденсатора  $\Delta q$  в каждом последующем цикле преобразования будет постепенно уменьшаться — происходит автостабилизация напряжения (насыщение). На рис. 2 приведены зависимости изменения приращения заряда на переменном конденсаторе в фазе заряда  $C_{var}$  при увеличении числа циклов преобразования, рассчитанные для  $\eta < 2$ ,  $R_{load} = \infty$  (кривая 1) и  $R_{load} = 3 \cdot 10^{10}$  Ом (кривая 2). В данных и последующих расчетах полагали, что  $C_1 = C_2 = 0,5$  нФ,  $C_0 = 100$  пФ, а  $V_0 = 1$  В (здесь  $C_0$  — емкость переменного конденсатора  $C_{var}$  в отсутствие внешней механической силы).

Видно, что при увеличении числа циклов приращение заряда переменного конденсатора  $\Delta q$  в каждом последующем цикле преобразования постепенно уменьшается. Причем в отсутствие нагрузки ( $R_{load} = \infty$ )  $\Delta q$ , в итоге, стремится к нулю. При этом протекание токов в цепях преобразователя также прекращается. Если же сопротивление нагрузки периодически подключается параллельно конденсатору  $C_1$  ( $R_{load} \neq \infty$ ), то установившийся режим достигается при  $\Delta q \neq 0$ . Режим автостабилизации

в этом случае наступает, когда разряд  $C_{var}$  в фазе разряда компенсируется ростом заряда  $C_{var}$  в фазе заряда. При этом протекание токов в цепях преобразователя не прекращается.

При  $\eta \geq 2$  действие механической силы также вызывает увеличение заряда и напряжения на конденсаторах  $C_{var}$ ,  $C_1$  и  $C_2$ . Причем в отсутствие нагрузки ( $R_{load} = \infty$ ) увеличение заряда переменного конденсатора  $\Delta q^{(n+1)}$  в фазе заряда  $C_{var}$  всегда будет преобладать над уменьшением заряда  $\Delta q^{(n)}$  в фазе его разряда, что приводит к монотонному увеличению заряда и напряжения на конденсаторах в каждом последующем цикле преобразования — реализуется режим неограниченного роста напряжения и заряда на конденсаторах (рис. 3, кривая 1).

Расчеты показывают, что и при  $\eta \geq 2$  с подключением сопротивления нагрузки скорость роста напряжения и заряда на конденсаторах тоже замедляется и может вообще прекратиться (рис. 3, кривая 2). При этом изменения зарядов конденсаторов в фазе разряда  $C_{var}$  точно компенсируются изменениями зарядов в фазе заряда  $C_{var}$ . Происходит автостабилизация процесса, хотя протекание токов в цепях преобразователя не прекращается. При этом для каждого значения  $R_{load}$  имеется свое критическое значение глубины модуляции емкости  $\eta$ , превышение которого приведет к возобновлению режима неограниченного монотонного роста напряжений и зарядов в схеме.

Если учесть, что за фазу разряда  $C_{var}$  изменение напряжения на конденсаторе  $C_1$  при  $T \ll R_{load}C_1$  ( $T$  — длительность цикла преобразования) достаточно мало, то при оценке количества заряда, прошедшего через сопротивление нагрузки за фазу

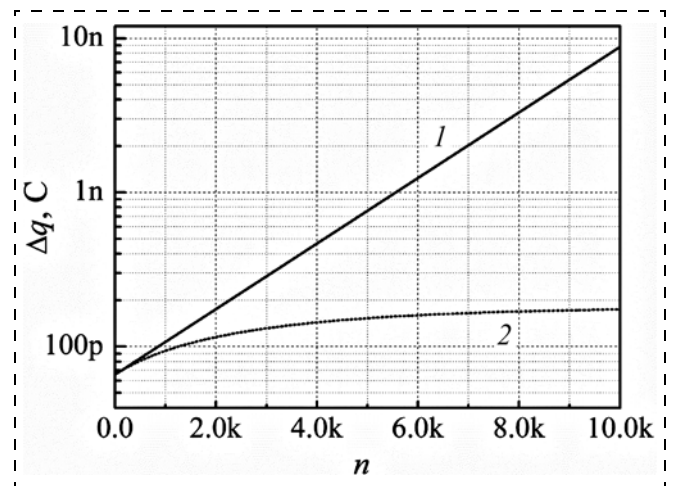


Рис. 3. Зависимости изменения приращения заряда на переменном конденсаторе  $C_{var}$  в фазе его заряда от числа циклов преобразования для  $\eta = 2,01$ : 1 —  $R_{load} = \infty$ ; 2 —  $R_{load} = 1 \cdot 10^{10}$  Ом  
 Fig. 3. Dependences of the change in the charge increment of the variable capacitor  $C_{var}$  in the phase of its charge on the number of conversion cycles for  $\eta = 2.01$ : 1 —  $R_{load} = \infty$ ; 2 —  $R_{load} = 1 \cdot 10^{10}$  Ω

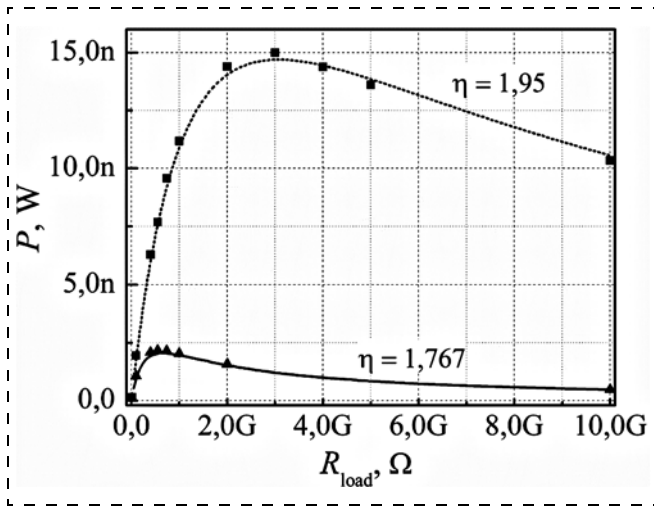


Рис. 4. Зависимости мощности, выделяемой в нагрузке, от сопротивления нагрузки, рассчитанные при  $\eta = 1,767$  и  $1,95$ . Кривые — расчет с использованием (6), маркеры — расчет с учетом изменения напряжения на  $C_1$

Fig. 4. Dependences of the output power on the load resistance obtained at  $\eta = 1.767$  and  $1.95$ . Lines are calculations using (6). Figures are calculations taking into account the voltage variations across  $C_1$

разряда переменного конденсатора, им можно пренебречь. При этом выражение для расчета количества заряда, прошедшего через сопротивление нагрузки за фазу разряда переменного конденсатора, может быть представлено в виде

$$\Delta q_R^{(n)} \approx 0,5 \frac{V_{C_1}^{(n-1)} T}{R_{\text{load}} C_1},$$

где  $V_{C_1}^{(n-1)}$  — минимальное напряжение на конденсаторе  $C_1$  в конце  $(n-1)$ -й фазы заряда  $C_{\text{var}}$ .

Анализ работы микрогенератора при сделанных допущениях показывает, что в установившемся режиме напряжение на конденсаторе  $C_1$  будет равно

$$V_{1,\text{min}} = V_0 \frac{\eta - 1}{2 - \eta + 0,5(C_{\text{min}}^{-1} + C_2^{-1})T/R_{\text{load}}}. \quad (6)$$

Согласно (6) установившийся режим при периодическом подключении нагрузки будет наблюдаться, только если глубина модуляции емкости  $C_{\text{var}}$  не превысит некоторого критического значения  $\eta_{\text{cr}}$ :

$$\eta_{\text{cr}} = 2 + 0,5(C_{\text{min}}^{-1} + C_2^{-1})T/R_{\text{load}}.$$

Выражение (6) позволяет также рассчитать мощность, выделяемую в нагрузке. На рис. 4 приведены зависимости мощности, выделяемой в нагрузке, от сопротивления нагрузки, рассчитанные при  $\eta = 1,767$  и  $1,95$  с использованием выражения (6) — кривые 1, 2. В расчетах принимали  $T = 0,02$  с. На этом же рисунке приведены аналогичные зави-

симости, рассчитанные с учетом изменения напряжения на конденсаторе  $C_1$  при оценке количества заряда, прошедшего через сопротивление нагрузки за фазу разряда переменного конденсатора (маркеры). Видно, что результаты расчетов с учетом и без учета изменения напряжения на  $C_1$  достаточно хорошо согласуются.

Зависимости на рис. 4 показывают, что для каждого  $\eta$  существует свое оптимальное сопротивление нагрузки  $R_{\text{load, opt}}$ , при котором скорость передачи энергии в нагрузку (мощность) максимальна. С учетом (6) можно показать, что

$$R_{\text{load, opt}} = 0,5(C_{\text{min}}^{-1} + C_2^{-1}) \frac{T}{2 - \eta}. \quad (7)$$

Согласно (7) значение оптимального сопротивления нагрузки определяется длительностью цикла преобразования, значениями минимальной и максимальной емкостей переменного конденсатора, а также емкостью конденсатора  $C_2$ .

На рис. 5 приведена зависимость оптимального сопротивления нагрузки от глубины модуляции емкости переменного конденсатора, рассчитанная с использованием (7). Видно, что при  $T = 0,02$  с,  $C_{\text{min}} = 75,7$  пФ,  $C_2 = 0,5$  нФ (кривая 1) и  $C_2 = 10$  нФ (кривая 2) оптимальное сопротивление нагрузки увеличивается примерно от 150 МОм до 100 ГОм при изменении глубины модуляции емкости переменного конденсатора от 1 до 2.

При оптимальном сопротивлении нагрузки средняя мощность, выделяемая в нагрузке, будет равна

$$P_{\text{load, max}} = 0,25 \frac{V_0^2 (\eta - 1)^2}{(2 - \eta) T (C_{\text{min}}^{-1} + C_2^{-1})}. \quad (8)$$

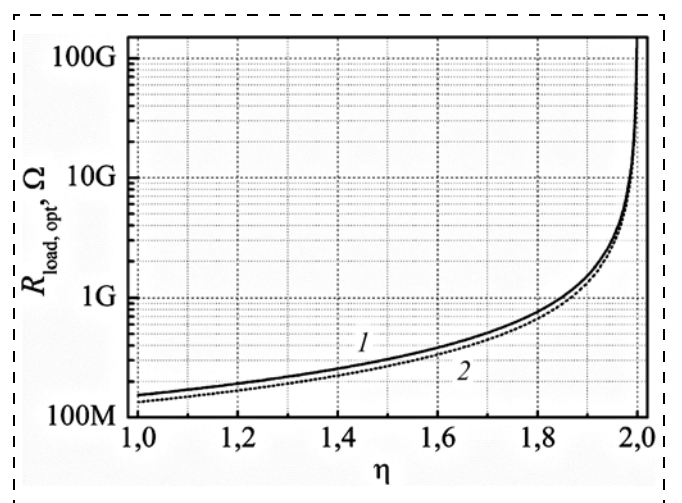


Рис. 5. Зависимости оптимального сопротивления нагрузки от глубины модуляции емкости  $C_{\text{var}}$

Fig. 5. Dependences of the optimal load resistance on  $C_{\text{var}}$  capacitance modulation depth

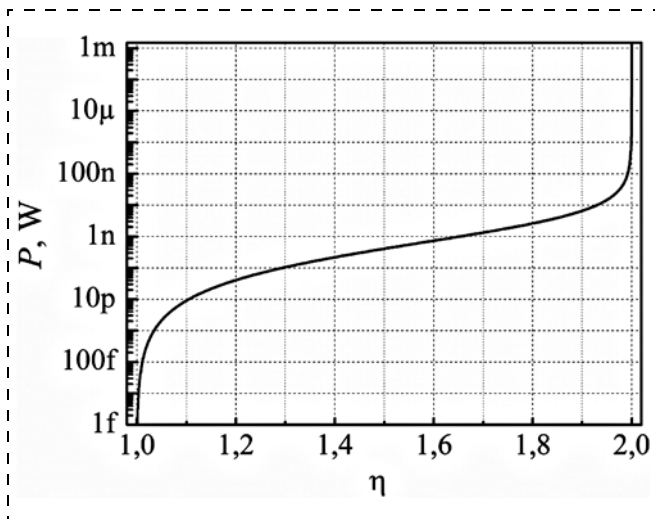


Рис. 6. Зависимость средней мощности, выделяемой в нагрузке, от глубины модуляции емкости

Fig. 6. Dependence of the average output power on  $C_{var}$  capacitance modulation depth

На рис. 6 приведена зависимость средней мощности, выделяемой в нагрузке, от глубины модуляции емкости переменного конденсатора, рассчитанная с использованием (8).

Видно, что при использовании электрета, заряженного до напряжения в несколько десятков вольт, мощность, выделяемая в нагрузке, в данной схеме может составить порядка сотни микроватт.

## Заключение

Проведенные исследования показали, что в модифицированной схеме МГ на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором, содержащим встроенный заряд, периодическое подключение нагрузки параллельно накопительному конденсатору  $C_1$  в фазе разряда переменного конденсатора может приводить к остановке монотонного неограниченного роста напряжений и зарядов и к режиму автостабилизации, даже при  $\eta \geq 2$ .

Режим автостабилизации при  $\eta \geq 2$  наступает, когда разряд накопительного конденсатора  $C_1$  может компенсировать рост заряда  $C_1$ . Для этого при заданном  $R_{load}$ , определяющем скорость разряда  $C_1$ , глубина модуляции емкости  $\eta$ , определяющая скорость заряда  $C_1$ , должна быть меньше некоторого критического значения  $\eta_{cr}$ , превышение которого приведет к возобновлению режима неограниченного монотонного роста напряжений и зарядов в схеме. При уменьшении сопротивления нагрузки  $R_{load}$  критическая глубина модуляции емкости  $\eta_{cr}$  увеличивается.

Установлено, что в отличие от случая с  $R_{load} = \infty$  при  $R_{load} \neq \infty$  в установившемся режиме автостабилизации изменения зарядов конденсаторов в ис-

следуемой схеме не прекращаются, а стабилизируются. При этом изменения зарядов и напряжений в фазе разряда переменного конденсатора компенсируются противоположным изменением зарядов и напряжений в фазе заряда  $C_{var}$ . В этом случае ток по сопротивлению нагрузки, даже в установившемся режиме, не прекращается.

Получены аналитические выражения для оценки основных характеристик микрогенератора в режиме автостабилизации при  $R_{load} \neq \infty$ .

## Список литературы

1. Драгунов В. П., Остертак Д. И., Синицкий Р. Е. Электростатический микроэлектромеханический генератор с непрерывной генерацией тока в режиме автостабилизации // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 1. С. 51—59.
2. Wei C., Jing X. A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 74. P. 1—18. Doi: 10.1016/j.rser.2017.01.073.
3. Dragunov V. P., Ostertak D. I. Microelectromechanical converters // Russian Microelectronics. 2012. Vol. 41, N. 2. P. 107—121. Doi: 10.1134/S1063739712010027.
4. Khan F. U., Qadir M. U. State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2015. Vol. 26, N. 10. Art. No. 103001 (28 p.). Doi: 10.1088/0960-1317/26/10/103001.
5. Torres E. O., Rincón-Mora G. A. A 0.7- $\mu\text{m}$  BiCMOS Electrostatic Energy-Harvesting System IC // IEEE Journal of solid-state circuits. 2010. Vol. 45, N. 2. P. 483—496. Doi: 10.1109/JSSC.2009.2038431.
6. Truong B. D., Le C. P., Halvorsen E., Roundy S. Power-electronic-interface topology for MEMS energy harvesting with multiple transducers // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1052. Art. N. 012074 (5 p.). Doi: 10.1088/1742-6596/1052/1/012074.
7. Phan T. N., Azadmehr M., Le C. P., Halvorsen E. Low power electronic interface for electrostatic energy harvesters // Journal of Physics: Conf. Series. 2015. Vol. 660. Art. N. 012087 (5 p.). Doi: 10.1088/1742-6596/660/1/012087.
8. de Queiroz A. C. M., Domingues M. The doubler of electricity used as battery charger // IEEE Transactions on Circuits and Systems — II: Express Briefs. 2011. Vol. 58, N. 12. P. 797—801. Doi: 10.1109/TCSII.2011.2173963.
9. de Queiroz A. C. M. Electrostatic energy harvesting using capacitive generators without control circuits // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2015. Vol. 85, Is. 1. P. 57—64. Doi: 10.1007/s10470-015-0577-0.
10. de Queiroz A. C. M. Variations of the doubler of electricity // Physics Education. 2019. Vol. 54. Art. N. 035019 (13p). Doi: 10.1088/1361-6552/ab0e3d.
11. Драгунов В. П., Доржиев В. Ю. Микроэлектромеханический генератор на основе дубликатора Беннета // Нано- и микросистемная техника. 2012, № 11 (148). С. 39—42.
12. Dragunov V., Dorzhiev V. Electrostatic vibration energy harvester with increased charging current // Journal of Physics: Conference Series. 2013. Vol. 476. N. 1. Art. N. 012115 (5p). Doi: 10.1088/1742-6596/476/1/012115.
13. Dorzhiev V., Karami A., Basset P., Dragunov V., Galayko D. MEMS electrostatic vibration energy harvester without switches and inductive elements // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 557, N. 1. Art. No. 012126 (5p). Doi: 10.1088/1742-6596/557/1/012126.

14. **Truong B. D., Le C. P., Halvorsen E.** Analysis of Electrostatic Energy Harvesters Electrically Configured as Bennet's Doublers // IEEE Sensors Journal. 2017. Vol. 17, Is. 16. P. 5180–5191. Doi: 10.1109/JSEN.2017.2723571.

15. **Karami A., Basset P., Galayko D.** Electrostatic vibration energy harvester using an electret-charged MEMS transducer with an unstable auto-synchronous conditioning circuit // Jour-

nal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 660. N. 1. Art. N. 012025 (5p). Doi: 10.1088/1742-6596/660/1/012025.

16. **Dragunov V. P., Dorzhiev V. Y., Ostertak D. I., Atuchin V. V.** A new autostabilization mechanism in the Bennet doubler circuit-based electrostatic vibrational energy harvester // Sensors and Actuators. A: Physical. 2018. Vol. 272. P. 259–266. Doi: 10.1016/j.sna.2018.01.053.

---

**V. P. Dragunov**, D. Sc., Professor, drag@adm.nstu.ru, **D. I. Ostertak**, Ph. Dc., Associate Professor, ostertak@ngs.ru, **R. E. Sinitskiy**, M. Sc. Student, sinitsky.rodion@yandex.ru, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Ostertak Dmitriy I.**, Associate Professor, Novosibirsk State Technical University, Russian Federation, Novosibirsk, 630073, Prospekt K. Marksa, 20, ostertak@ngs.ru

## An Analysis of the Microelectromechanical Generator with Periodical Load Connection

*Received on June 13, 2019*

*Accepted on June 28, 2019*

*The operation of the Bennet doubler circuit-based single-capacitor electrostatic microelectromechanical generator with built-in voltage and a load resistor, which is periodically connected in parallel to the storage capacitor branch, is analyzed. It is shown that the connection of the load resistor  $R_{load}$  in parallel to the storage capacitor can lead to the termination of the unlimited voltages and charges growth even for variable capacitance modulation depth  $\eta \geq 2$ . The equations enabling to evaluate the microgenerator main parameters in the autostabilization regime at  $R_{load} \neq \infty$  are obtained. It is established that the autostabilization regime at  $\eta \geq 2$  and a defined load resistor occurs only if the capacitance modulation depth  $\eta$  is less than some critical value  $\eta_{cr}$ . If the value of  $\eta$  is higher than  $\eta_{cr}$  the monotonous unlimited growth of the voltages and charges in the circuit is observed. It is demonstrated that in contrast to the case with  $R_{load} = \infty$  for the case when  $R_{load} \neq \infty$  in the steady-state autostabilization regime the capacitors charges do not stop to change and get stable.*

**Keywords:** microelectromechanical converter, Bennet doubler, energy conversion, autostabilization regime, microgenerator, critical values

*For citation:*

**Dragunov V. P., Ostertak D. I., Sinitskiy R. E.** An Analysis of the Microelectromechanical Generator with Periodical Load Connection, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 9, pp. 546–554.

DOI: 10.17587/nmst.21.546-554

### Introduction

As noted in [1, 2], new types of autonomous power sources based on microelectromechanical converters (MEMC) of the energy located directly at the location of autonomous devices, such as, for example, are being actively developed and investigated, nodes of wireless sensor networks.

In order to transfer electrical energy obtained using MEMC to the load, the converter is included to the corresponding electrical circuits (interface circuits) [3–7]. Such a system as a whole is a kind of micro-generator (MG).

MG parameters essentially depend both on the design and characteristics of the MEMC, and on the interface circuit. The choice of the interfacing scheme at the stage of MG design is the most important task.

One of the most promising interfacing schemes for electrostatic MGs is currently the Bennet doubler scheme and its modifications [8–14].

In [15, 16], an analysis of the interfacing scheme was carried out on the basis of a Bennet doubler with a variable capacitor containing a built-in charge, which eliminated the need to report the initial charge to MEMC, and it was shown that this circuit retains its performance even with the capacitance modulation depth less than two. Thus, on the basis of this conditioning scheme, it became possible to create MGs operating at small amplitudes of external mechanical vibrations.

Further studies of this circuit [1] showed that connecting the load parallel to the storage capacitor allows to obtain continuous current generation in the autostabilization mode.



This paper analyzes the microgenerator based on the modified Bennet doubler circuit with a variable capacitor containing a built-in charge and an additional resistor in the storage capacitor circuit periodically connected in parallel to the storage capacitor during the discharge phase of the variable capacitor.

### Model

The electrical circuit of a microgenerator based on a modified Bennet doubler with one variable capacitor containing a built-in charge and periodically connected load is shown in fig. 1. The circuit contains a variable capacitor  $C_{\text{var}}$  — MEMC, two constant capacitors  $C_1$  (storage capacitor) and  $C_2$ , as well as four switches  $Sw_1$ — $Sw_4$ . To create a built-in electric field in  $C_{\text{var}}$ , an electret — dielectric with a built-in charge is used, located on one of the electrodes of the variable capacitor. The equivalent circuit of a capacitor with an electret is shown in fig. 1 by the  $C_{\text{var}}$  module and the voltage source  $V_0$  in the variable capacitor circuit. The load  $R_{\text{load}}$  is connected parallel to the capacitor  $C_1$  when the switch  $Sw_4$  is closed.

The conversion of mechanical energy into electrical energy occurs when the capacitance of a variable capacitor  $C_{\text{var}}$  varies periodically under the action of an external mechanical force from  $C_{\text{max}}$  to  $C_{\text{min}}$  and back.

The complete energy conversion cycle for this circuit includes two alternating phases: the charge phase and the discharge phase of the variable capacitor  $C_{\text{var}}$ . Load resistance  $R_{\text{load}}$  is periodically connected in parallel with storage capacitor  $C_1$  only in the discharge phase of the capacitor  $C_{\text{var}}$ .

We will analyze the operation of the generator, assuming that the resistance of the switch in the open state are equal to infinity, and in the closed state to several tens of ohms. The phase of the  $C_{\text{var}}$  discharge will be denoted by the index  $(n)$ , and the phases of the charge — by the indices  $(n - 1)$  and  $(n + 1)$ .

In the charge phase of the capacitor  $C_{\text{var}}$ , when its capacity increases, the switch  $Sw_3$  is opened, and the switches  $Sw_1$  and  $Sw_2$  are closed and  $C_{\text{var}}$  is charged through the  $V_0 \rightarrow C_2 \rightarrow Sw_1 \rightarrow C_{\text{var}}$  and  $V_0 \rightarrow Sw_2 \rightarrow C_1 \rightarrow C_{\text{var}}$  circuits. At the end of the phase of the  $C_{\text{var}}$  charge, when  $C_{\text{var}} = C_{\text{max}}$ , the voltage on the variable capacitor takes the minimum value  $V_{\text{min}}$ . Wherein

$$V_{\text{min}} = V_{C_1, \text{char}} + V_0 = V_{C_2, \text{char}} + V_0, \quad (1)$$

where  $V_{C_1, \text{char}}$  and  $V_{C_2, \text{char}}$  are voltages on capacitors  $C_1$  and  $C_2$  at the end of the charge phase of  $C_{\text{var}}$ .

In the discharge phase of the capacitor  $C_{\text{var}}$ , when its capacitance decreases, the switches  $Sw_1$  and  $Sw_2$  are opened, the switches  $Sw_3$  and  $Sw_4$  are closed and the discharge of  $C_{\text{var}}$  takes place along the path  $C_{\text{var}} \rightarrow (C_1, R_{\text{load}}) \rightarrow Sw_3 \rightarrow C_2 \rightarrow V_0$ . In this case, at the end of the discharge phase of  $C_{\text{var}}$ , when  $C_{\text{var}} = C_{\text{min}}$ ,

the voltage on the variable capacitor reaches the maximum value  $V_{\text{max}}$ . Wherein

$$V_{\text{min}} = V_{C_1, \text{dis}} + V_{C_2, \text{dis}} + V_0, \quad (2)$$

where  $V_{C_1, \text{dis}}$  и  $V_{C_2, \text{dis}}$  are voltages on capacitors  $C_1$  and  $C_2$  at the end of the discharge phase of  $C_{\text{var}}$ .

After this, the conversion cycle is repeated.

The analysis shows that at the end of the  $n$ -th phase of the discharge of  $C_{\text{var}}$  the changes in the charges of the capacitors  $C_{\text{var}}$  and  $C_2$  will be equal to each other:

$$|\Delta q_{C_{\text{var}}}^{(n)}| = |\Delta q_{C_2}^{(n)}| = \Delta q^{(n)} \text{ where}$$

$$\Delta q^{(n)} = \left( \frac{1}{C_{\text{min}}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)^{-1} \times \left( \frac{q^{(n-1)}}{C_{\text{min}}} - \frac{q_{C_1}^{(n-1)}}{C_1} - \frac{q_{C_2}^{(n-1)}}{C_2} - V_0 + \frac{\Delta q_R^{(n)}}{C_1} \right), \quad (3)$$

where  $q^{(n-1)}$ ,  $q_{C_1}^{(n-1)}$  and  $q_{C_2}^{(n-1)}$  are the charges on the capacitors  $C_{\text{var}}$ ,  $C_1$  and  $C_2$  at the end of the  $(n - 1)$ -th phase of the charge of  $C_{\text{var}}$ , and  $\Delta q_R^{(n)}$  is the amount of charge that passed through the load resistance during the  $n$ -th phase of the discharge of  $C_{\text{var}}$ .

In turn, at the end of the  $(n + 1)$ -th phase of the charge of  $C_{\text{var}}$ , the expression for estimating the change in charge on the capacitor  $C_{\text{var}}$  takes the following form:

$$\Delta q^{(n+1)} = \frac{C_{\text{max}}(C_1 + C_2)}{C_{\text{max}} + C_1 + C_2} \times \left( \frac{q_{C_2}^{(n)} + q_{C_1}^{(n)}}{C_1 + C_2} + V_0 - \frac{q^{(n)}}{C_{\text{max}}} \right), \quad (4)$$

where  $q^{(n)}$ ,  $q_{C_1}^{(n)}$  и  $q_{C_2}^{(n)}$  are the charges on capacitors  $C_{\text{var}}$ ,  $C_1$  and  $C_2$  at the end of the  $n$ -th discharge phase of  $C_{\text{var}}$ .

Taking into account (1) and (3), it can also be shown that the change in charge on a variable capacitor at the end of the  $n$ -th phase of the discharge of  $C_{\text{var}}$  can be represented as

$$\Delta q^{(n)} = \frac{V_{\text{min}}^{(n-1)}(\eta - 2) + V_0 + \Delta q_R^{(n)}/C_1}{C_{\text{min}}^{-1} + C_1^{-1} + C_2^{-1}}, \quad (5)$$

where  $V_{\text{min}}^{(n-1)}$  is the minimum voltage on the capacitor  $C_{\text{var}}$  at the end of the  $(n - 1)$ -th phase of the charge, and  $\eta = C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$  is the capacitance modulation depth of the variable capacitor.

From the expression (5) it follows that at the initial stage, the action of the mechanical force always causes an increase in the voltage and charge of the capacitors, but the process of increasing the voltage and charge of the capacitors at different modulation depths of the capacitance can proceed differently.

When  $\eta < 2$ , the action of mechanical force, although initially causes an increase in charge and voltage on capacitors  $C_{\text{var}}$ ,  $C_1$  and  $C_2$ , but the increment in charge of the variable capacitor  $\Delta q$  in each subsequent conversion cycle will gradually decrease — the voltage is automatically stabilized (saturation). Fig. 2 shows the dependences of the change in the charge increment on a variable capacitor in the  $C_{\text{var}}$  charge phase with an increase of the number of conversion cycles calculated for  $\eta < 2$ ,  $R_{\text{load}} = \infty$  (curve 1) and  $R_{\text{load}} = 3 \cdot 10^{10} \Omega$  (curve 2). For the data and subsequent calculations, it was assumed that  $C_1 = C_2 = 0.5 \text{ nF}$ ,  $C_0 = 100 \text{ pF}$ , and  $V_0 = 1 \text{ V}$  (here  $C_0$  is the capacitance of the variable capacitor  $C_{\text{var}}$  in the absence of external mechanical force).

It can be seen that with an increase of the number of cycles, the increment in the charge of the variable capacitor  $\Delta q$  in each subsequent conversion cycle decreases gradually. And as a result in the absence of a load ( $R_{\text{load}} = \infty$ ) the value of  $\Delta q$  tends to zero. In this case, the flow of currents in the circuits of the converter also stops. If the load resistance is periodically connected parallel to the capacitor  $C_1$  ( $R_{\text{load}} \neq \infty$ ), then the steady state is reached when  $\Delta q \neq 0$ . The autostabilization mode in this case occurs when the discharge of  $C_{\text{var}}$  in the discharge phase is compensated by  $C_{\text{var}}$  charge growth during its charging. In this case, the flow of currents in the converter circuits does not stop.

When  $\eta \geq 2$ , the action of mechanical force also causes an increase in charge and voltage across capacitors  $C_{\text{var}}$ ,  $C_1$  and  $C_2$ . Moreover, in the absence of a load ( $R_{\text{load}} = \infty$ ), an increase in the charge of the variable capacitor  $\Delta q^{(n+1)}$  in the charge phase of  $C_{\text{var}}$  will always prevail over a decrease in charge  $\Delta q^{(n)}$  in the discharge phase, which leads to a monotonic increase in charge and voltage on capacitors in each subsequent conversion cycle — a mode of unlimited voltage and charge on capacitors is realized (fig. 3, curve 1).

Calculations show that even at  $\eta \geq 2$ , when the load resistance is connected, the rate of voltage and charge growth on the capacitors also slows down and can stop completely (fig. 3, curve 2). In this case, the changes in the charges of the capacitors in the discharge phase of  $C_{\text{var}}$  are exactly compensated by the variations in charges during the charge phase of  $C_{\text{var}}$ . Autostabilization of the process occurs, although the flow of currents in the converter circuits does not stop. In addition, for each value of  $R_{\text{load}}$  there is a critical value of the modulation depth of capacitance  $\eta$ , the excess of which will lead to the resumption of the mode of unlimited monotonic growth of voltages and charges in the circuit.

If we take into account that during the discharge phase of  $C_{\text{var}}$  the voltage variation on the capacitor  $C_1$  at  $T \ll R_{\text{load}} C_1$  ( $T$  is the duration of the conversion cycle) is quite small, then when estimating the amount of charge passed through the load resistance during the discharge phase of the variable capacitor can be neglected. In this case, the expression for calculating the amount of charge that has passed through the resistivity of the load during the discharge phase of the variable capacitor can be represented as

$$\Delta q_R^{(n)} \approx 0.5 \frac{V_{C_1}^{(n-1)} T}{R_{\text{load}} C_1},$$

where  $V_{C_1}^{(n-1)}$  is the minimum voltage on the capacitor  $C_1$  at the end of the  $(n-1)$ -th phase of the charge of  $C_{\text{var}}$ .

Analysis of the microgenerator operation under the assumptions made shows that in steady state the voltage on the capacitor  $C_1$  will be equal to

$$V_{1,\text{min}} = V_0 \frac{\eta - 1}{2 - \eta + 0.5(C_{\text{min}}^{-1} + C_2^{-1})T/R_{\text{load}}}. \quad (6)$$

According to (6), the steady state with periodic load connection will be observed only if the modulation depth of the capacitance  $C_{\text{var}}$  does not exceed a certain critical value  $\eta_{\text{cr}}$ :

$$\eta_{\text{cr}} = 2 + 0.5(C_{\text{min}}^{-1} + C_2^{-1})T/R_{\text{load}}.$$

The expression (6) also allows you to calculate the power dissipated in the load. Fig. 4 shows the dependences of the power dissipated in the load, on the load resistance, calculated at  $\eta = 1.767$  and  $1.95$  with the use of the expression (6) — the curves 1, 2. In the calculations,  $T = 0.02 \text{ s}$  was taken. The same figure shows similar dependencies calculated taking into account changes in the voltage on capacitor the  $C_1$  when estimating the amount of charge passed through the load resistance during the discharge phase of the variable capacitor (markers). It can be seen that the results of calculations with and without accounting for the change in voltage on  $C_1$  are in fairly good agreement.

Dependencies in fig. 4 show that for each  $\eta$  there exists its own optimal load resistance  $R_{\text{load, opt}}$ , at which the rate of energy transfer to the load (power) is maximum. In view of (6), it can be shown that

$$R_{\text{load, opt}} = 0.5(C_{\text{min}}^{-1} + C_2^{-1}) \frac{T}{2 - \eta}. \quad (7)$$

According to (7), the value of the optimal load resistance is determined by the duration of the conversion cycle, the values of the minimum and maximum capacitances of the variable capacitor, and the capacitance of the capacitor  $C_2$ .

Fig. 5 shows the dependence of the optimal load resistance on the capacitance modulation depth of the variable capacitor, calculated using (7). It is seen that at  $T = 0.02$  s,  $C_{\min} = 75.7$  pF,  $C_2 = 0.5$  nF (curve 1) and  $C_2 = 10$  nF (curve 2) the optimal load resistance increases from about 150 M $\Omega$  to 100 G $\Omega$  when changing the capacitance modulation depth of the variable capacitor from 1 to 2.

With optimal load resistance, the average power dissipated in the load will be equal to

$$P_{\text{load, max}} = 0.25 \frac{V_0^2 (\eta - 1)^2}{(2 - \eta) T (C_{\min}^{-1} + C_2^{-1})}. \quad (8)$$

Fig. 6 shows the dependence of the average power dissipated in the load on the capacitance modulation depth of the variable capacitor calculated using (8).

It can be seen that when using an electret charged to a voltage of several tens of volts, the power dissipated in the load in this circuit can be on the order of hundreds of microwatts.

## Conclusion

The studies have shown that in the modified MG scheme based on the Bennet doubler with a single variable capacitor containing a built-in charge, periodically connecting the load parallel to a storage capacitor  $C_1$  in the discharge phase of the variable capacitor can lead to a monotonous unlimited growth of voltages and charges and to the autostabilization mode, even with  $\eta \geq 2$ .

The autostabilization mode at  $\eta \geq 2$  occurs when the discharge of the storage capacitor  $C_1$  can compensate for the growth of the charge  $C_1$ . To do this, for a given  $R_{\text{load}}$ , which determines the discharge rate of  $C_1$ , the modulation depth of the capacitor  $\eta$ , which determines the charge rate of  $C_1$ , must be less than a certain critical value  $\eta_{\text{cr}}$ , the excess of which will lead to the resumption of the mode of unlimited monotonous growth of voltages and charges in the circuit. As the load resistance  $R_{\text{load}}$  decreases, the critical modulation depth of the capacitance  $\eta_{\text{cr}}$  increases.

It was found that, in contrast to the case with  $R_{\text{load}} = \infty$ , in the case of  $R_{\text{load}} \neq \infty$ , in the steady-state autostabilization mode, the changes in the charges of the capacitors in the circuit under study do not stop, but stabilize. In this case, changes in the charges and voltages in the discharge phase of the variable capacitor are compensated by the opposite change in charges and voltages in the phase of the  $C_{\text{var}}$  charge. In this case, the current across the load resistance even in the steady state does not stop.

Analytical expressions are obtained for the evaluation of the main characteristics of a microgenerator in the autostabilization mode with  $R_{\text{load}} \neq \infty$ .

## References

1. Dragunov V. P., Ostertak D. I., Sinitskiy R. E. Elektrostaticheskij mikroelektromekhanicheskij generator s nepreryvnoj generaciej toka v rezhime avtostabilizacii, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 51–59 (in Russian).
2. Wei C., Jing X. A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 74, pp. 1–18, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.073.
3. Dragunov V. P., Ostertak D. I. Microelectromechanical converters, *Russian Microelectronics*, 2012, vol. 41, no. 2, pp. 107–121, doi: 10.1134/S10663739712010027.
4. Khan F. U., Qadir M. U. State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, vol. 26, no. 10, art. No. 103001 (28p), doi: 10.1088/0960-1317/26/10/103001.
5. Torres E. O., Rincón-Mora G. A. A 0.7- $\mu\text{m}$  BiCMOS Electrostatic Energy-Harvesting System IC, *IEEE Journal of solid-state circuits*, 2010, vol. 45, no. 2, pp. 483–496, doi: 10.1109/JSSC.2009.2038431.
6. Truong B. D., Le C. P., Halvorsen E., Roundy S. Power-electronic-interface topology for MEMS energy harvesting with multiple transducers, *Journal of Physics: Conf. Series*, 2018, vol. 1052, art. No. 012074 (5p), doi: 10.1088/1742-6596/1052/1/012074.
7. Phan T. N., Azadmehr M., Le C. P., Halvorsen E. Low power electronic interface for electrostatic energy harvesters, *Journal of Physics: Conf. Series*, 2015, vol. 660, art. No. 012087 (5p), doi: 10.1088/1742-6596/660/1/012087.
8. de Queiroz A. C. M., Domingues M. The doubler of electricity used as battery charger, *IEEE Transactions on Circuits and Systems — II: Express Briefs*, 2011, vol. 58, no. 12, pp. 797–801, doi: 10.1109/TCSII.2011.2173963.
9. de Queiroz A. C. M. Electrostatic energy harvesting using capacitive generators without control circuits, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2015, vol. 85, is. 1, pp. 57–64, doi: 10.1007/s10470-015-0577-0.
10. de Queiroz A. C. M. Variations of the doubler of electricity, *Physics Education*, 2019, vol. 54, art. No. 035019 (13p), doi: 10.1088/1361-6552/ab0e3d.
11. Dragunov V. P., Dorzhiev V. Yu. Mikroelektromekhanicheskij generator na osnove duplikatora Benneta, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 11 (148), pp. 39–42 (in Russian).
12. Dragunov V., Dorzhiev V. Electrostatic vibration energy harvester with increased charging current, *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, vol. 476, no. 1, art. No. 012115 (5p), doi: 10.1088/1742-6596/476/1/012115.
13. Dorzhiev V., Karami A., Basset P., Dragunov V., Galayko D. MEMS electrostatic vibration energy harvester without switches and inductive elements, *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 557, no. 1, art. No. 012126 (5p), doi: 10.1088/1742-6596/557/1/012126.
14. Truong B. D., Le C. P., Halvorsen E. Analysis of Electrostatic Energy Harvesters Electrically Configured as Bennet's Doublers, *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17, iss. 16, pp. 5180–5191, doi: 10.1109/JSEN.2017.2723571.
15. Karami A., Basset P., Galayko D. Electrostatic vibration energy harvester using an electret-charged MEMS transducer with an unstable auto-synchronous conditioning circuit, *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 660, no. 1, art. No. 012025 (5p), doi: 10.1088/1742-6596/660/1/012025.
16. Dragunov V. P., Dorzhiev V. Y., Ostertak D. I., Atuchin V. V. A new autostabilization mechanism in the Bennet doubler circuit-based electrostatic vibrational energy harvester, *Sensors and Actuators. A: Physical*, 2018, vol. 272, pp. 259–266, doi: https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.01.053.

**И. И. Абрамов**, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск,  
220013, Республика Беларусь, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

### СОЗНАНИЕ ЧЕЛОВЕКА, ИЛИ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНИКИ. ЧАСТЬ III.

Поступила в редакцию 22.04.2019

*На основе предложенной ранее полной электронной интерпретации функционирования мозга рассмотрен феномен "сознание человека". В части III работы в результате более детального анализа процесса осознанной обработки сенсорной информации сформулирован основной принцип функционирования мозга — преобразование сигналов и энергетических реконструкций, а также рассмотрены: понятие "квалиа"; характер обработки информации мозгом, природы жизни; основные проблемы и направления исследования сознания.*

**Ключевые слова:** сознание человека, мозг, полная электронная интерпретация, наноэлектроника

#### Осознанная обработка сенсорной информации

Рассмотрим сначала один из самых сложных режимов работы мозга — осознанную обработку сенсорной информации. Согласно предложенной полной электронной интерпретации функционирования мозга [1—6] — это один из вариантов смешанных (третий тип) режимов работы мозга. Попробуем уточнить, что при этом происходит, так как в части I [7], в сущности, рассмотрен доминирующий процесс в работе сознания. В качестве основы, кроме отмеченных принципов в части I [7] использовалась и современная информация нейронауки, прежде всего нейробиологии (см., например, работы [8—14]), а также привлекавшаяся для построения эмпирических теорий сознания (хороший их обзор приведен в учебнике [15]), а именно: теории глобального рабочего пространства Баарса; теории нейронального глобального рабочего пространства Деана и др.; нейробиологической теории Крика и Коха; теории динамического ядра Тонони и Эдельмана; теории информационной интеграции Тонони; теории рекуррентной обработки Ламме; теории сознания как чувства происходящего Дамасио и др. С точки зрения автора, эмпирические теории сознания представляют наибольшую перспективу для дальнейшего развития, так как основываются на серьезной научной базе (данных нейробиологии, нейронауки в целом), а не фанта-

зиях, т. е. будем по-прежнему анализировать феномен "сознание человека" в соответствии с принципом "бритвы Оккама" [7].

При детализации процесса осознанной обработки сенсорной информации, строго говоря, необходимо анализировать полную систему, а именно [7, 16]: мозг — другие составляющие нервной системы — тело — окружающая среда. В части I [7] отмечалось, что, к сожалению, возможно лишь приближенное рассмотрение явлений, происходящих в полной системе, поэтому проанализируем, что происходит хотя бы в целом на каждом из основных этапов процесса обработки.

*Преобразования* информации начинаются с самого начала процесса после попадания сигналов из внешней среды и от внутренних органов на рецепторы сенсорных систем. Известно, что рецепторы, как правило, предназначены для принятия одного вида сигналов. В то же время попадающие на тело, в том числе рецепторы, сигналы могут быть самыми разнообразными [1, 2]: механическими, оптическими, тепловыми, химическими, электрическими и др. Кроме того, не следует забывать, что расположение рецепторов на теле человека носит дискретный характер. В связи с этим сразу же проводятся *редуцирование и декомпозиция* входящей информации от окружающей среды и внутренних органов. Например, известно, что для

первичной обработки электромагнитных волн используются рецепторы (точнее фотопигменты, см. далее), чувствительные только к трем областям длин волн оптического диапазона, приблизительно соответствующих возможности человека отличать красный, зеленый и синий цвета.

Итак, когда начинается обработка информации? Ответ очевиден: сразу. Особенно это хорошо понятно на примере электромагнитных волн, так как человек воспринимает только узкий спектр волн оптического диапазона. Влияет ли тело на этот процесс? Ответ менее очевиден, но все же: конечно. Это прежде всего связано с тем, что рецепторы сенсорных систем расположены в теле человека, а следовательно, влияние на них может быть, например, в результате изменения температуры тела, болезней, действия химических процессов и их изменения и т. п. Следует также особо отметить чувствительность нижних порогов ощущений от различных факторов, приводящих как к повышению, так и к понижению чувствительности, например, в зависимости от яркости освещения, индивидуальных различий, психологического, т. е. обратного, влияния, взаимодействия ощущений, и многих других (см., например, [17]).

Таким образом, при обработке сенсорных сигналов необходимо учитывать влияние как окружающей среды, что очевидно, так как поступающие сигналы идут от нее, так и тела. Поэтому не должно вызывать удивление все более распространяющееся мнение, особенно среди нейробиологов, о необходимости учета влияния и тела на сознание человека.

В результате поступления информации из внешней среды и от внутренних органов происходит ее декомпозиция по внешним и внутренним сенсорным системам, принципы работы которых хорошо описаны в учебнике [18]. После первичной обработки, как правило, стимул соответствующей модальности *конвертируется* в электрические сигналы. А далее эти сигналы распространяются по нервной системе с постоянными преобразованиями из электрических в химические (например, в химических синапсах) сигналы, и наоборот. Так как в этом процессе передачи информации принципиальное значение имеют различные каналы (ионные и др.), т. е. наноэлектромеханические системы (НЭМС) [7], то влияние оказывают и механические процессы. Другими словами, при передаче информации для дальнейшей обработки в главный информационный центр человека, т. е. мозг, идет постоянное преобразование сигналов, а следовательно, их изменения (*трансформация*), т. е., вообще говоря, предварительная обработка информации продолжается.

После таких *многочисленных преобразований* (редуцирования, декомпозиции, конвертирования, трансформации) сигналов, что должен сделать мозг, чтобы отразить действительность (в соответствии с отмеченным в части I [7] принципом отражения высшей нервной деятельности)? Он должен собрать все это вместе, т. е. сделать *реконструкцию* действительности в самом же мозге! Другого места у него просто нет. Как он это делает? Попытаемся это понять для процесса обработки сенсорной информации с использованием имеющихся и отмеченных ранее современных сведений из нейронаук.

Самое интересное заключается в том, что после поступления такой *разобранной информации* в мозг преобразования продолжают, т. е. до основательной реконструкции еще далеко. В дальнейшем для упрощения анализа будем проводить рассмотрение в соответствии с полной электронной интерпретацией функционирования мозга, т. е. считать нейронные цепи электрическими цепями первого типа, по которым распространяются электрические сигналы [1, 2, 4, 7].

Для сознательной обработки сенсорной информации *основное* значение имеют три крупных структуры мозга: ствол, таламус и кора. Сразу же отмечу, что влияние при выполнении различных психических функций, включая сознание, могут оказывать и другие структуры мозга. Это также связано с тем, что мозг характеризуется дублированием в работе нейронных цепей. Необходимо это для обеспечения *надежности* функционирования мозга. Кроме того, идет постоянный обмен информацией (сигналами) между различными областями мозга, нейронными цепями, нейронами. И все это может быть важным! В связи с этим допустимо говорить лишь о ключевых структурах, основных процессах. Отмеченные особенности работы мозга приводят к многочисленным возможным вариантам исполнения мозгом даже казалось бы одних и тех же психических функций. Поэтому далее рассматриваем только несколько возможных вариантов обработки сенсорной информации, которые, однако, позволяют выделить основные закономерности, характерные особенности и доминантные процессы.

Ствол мозга, судя по всему, играет важное значение для поддержания необходимого уровня активации структур мозга, соответствующего состоянию бодрствования человека. При этом является также важным обмен информацией (сигналами) с корой головного мозга, проходящей через таламус, т. е. туда и обратно. Кора вместе с таламусом таким образом регулирует деятельность ствола, поддерживая в результате кооперативной работы состоя-

ние бодрствования. Ключевое же значение непосредственно для сознательной обработки сенсорной информации, как обычно считается в нейробиологии (см. например, [9]), имеет таламокортикальная система (таламус и кора головного мозга). Известный нейробиолог А. Дамасио, однако, считает, что "самые первые проявления психики возникают в стволовой части мозга" [19]. Многое конечно зависит от того, что иметь в виду. Как было показано ранее, обработка информации начинается с самого начала процесса.

Поступившая разобранная информация об окружающей среде и теле в мозг распределяется далее таламусом (своеобразным "коммутатором", как его часто образно называют в нейробиологии) на карты соответствующих сенсорам систем<sup>1</sup>: зрительной, слуховой, осязательной (тактильной), вкусовой. Единственным исключением является информация о запахах (обонятельная система) [12]. Она попадает на карту, минуя таламус. Поэтому также различают следующие виды "памяти: зрительная, слуховая, обонятельная, вкусовая и осязательная (тактильная)" [20]. Сенсорные карты — это области коры головного мозга, в которых хранится соответствующая информация в разобранном виде в результате иерархической обработки, проведенной ранее, и, судя по всему, частично заложенной генетически. В настоящее время в целом определены области мозга (нормально функционирующего), в которых расположены карты (см., например, [9]).

Для дальнейшего рассмотрения нам важно отметить следующее: "Задняя часть коры содержит области проекций основных органов чувств: зрения, слуха, осязания, обоняния и вкуса. Напротив, передняя часть включает регуляцию действий, планирование, некоторые функции рабочей памяти, речь и им подобное" [9].

Таким образом, карты сенсорных систем и карты целей, смыслов разделены в мозге существенно. В то же время карты сенсорных систем расположены в различных областях коры головного мозга.

Сначала у специалистов вызвало крайнее удивление следующее: "мозг использует одни и те же области, чтобы вообразить какую-нибудь сцену и увидеть ее в действительности" [21]. Сейчас эта точка зрения признана многими нейробиологами (см., например, [9, 22]). Следовательно, при обработке поступающей сенсорной информации идет *иерархическая сборка* информации в результате прохождения электрических сигналов по нейронным цепям соответствующей области коры. Это

<sup>1</sup> Более детальное разбиение на сенсорные системы приведено в работе [18]. И в этом случае, однако, можно говорить о соответствующих картах.

говорит о том, что *из разобранной информации, полученной и заложенной ранее на хранение (закодированной), может быть воспроизведена в результате прохождения электрических сигналов (декодировки) не только старая, но и, что особенно восхищает, вновь поступающая информация, т. е. новая!* Таким образом, идет гибкая сборка вновь поступившей информации из самых разнообразных фрагментов<sup>2</sup>. Эта *реконструированная* информация, к сожалению, разрозненная по картам мозга, т. е. надо продолжить объединять ее, но уже в единое целое.

Зачем такие казалось бы на первый взгляд сложности? Главный смысл этого заключается в необходимости чрезвычайно экономичного хранения информации, как для запоминания, так и воспроизведения старой и новой информации, т. е. бережного отношения к имеющимся ресурсам коры головного мозга, которые, к сожалению, ограничены, и в то же время мозг должен и может надежно работать десятилетиями. Следовательно, речь идет об определенных, достаточно универсальных механизмах обработки информации с помощью электрических (нейронных) цепей первого типа после ее предварительной обработки на входе в соответствующие сенсорные системы. В результате реактивации соответствующих нейронных цепей карт сенсорных систем фактически собираются коалиции (назовем их *коалиции нейронов сенсорных карт*), ответственные за реконструкции тех или иных воспоминаний и/или действительности. Случай "и" может соответствовать галлюцинациям, инициированным извне.

Далее происходит еще более интересное. Информация от сенсорных карт поступает в лобные доли для объединения в единое целое. И здесь возможно множество различных вариантов. В связи с этим рассмотрим лишь некоторые, характерные.

Предположим, что вы идете по улице. Обычно все происходит в автоматическом (на подсознательном уровне) режиме, т. е. работает система 1 [7]. Фактически сигналы, проходящие по объединенной коалиции нейронов, и есть планирование (моделирование или прогноз) ситуации [7] (назовем объединение нейронов в данном случае *коалицией планирования или прогнозирования*), а дальше происходит инициация действия (см. рис. 1, стр. 313 [7]) и передача сигналов соответствующим системам для исполнения. Замечу, что согласно данным нейробиологии карты действия расположены рядом, т. е. тоже в лобной доле, что приводит к эко-

<sup>2</sup> Вспомним о пикселях в экранах телевизоров и других устройствах. В мозге, однако, это происходит намного изощреннее, так как очевидно, что экрана в нем нет, да и подобных традиционной электронике воспроизводящих устройств тоже. Все сделано универсальнее и интереснее.



номии времени взаимодействия. Так фактически происходит подсознательное действие в данном случае со значительной экономией времени, что может быть важным. По оценкам нейробиологов для осуществления таких действий требуется около 100 мс [9].

Однако самое интересное все же происходит в другом случае. Предположим, что коалиция нейронов, хотя бы одной из сенсорных систем, сигнализирует об опасности. Например, вы увидели в процессе движения по улице что-то опасное. В данной ситуации происходит повышение активации и превышение порога осознания, который может зависеть от многих факторов, а также своеобразный резонанс с картами целей, смыслов в лобных долях. Известно, что "в состоянии бодрствования префронтальная кора является наиболее активной" [20], т. е. как бы находится в режиме ожидания, своеобразного сканирования ситуации. Не исключено, что соответствующие области (подобласти) лобных долей дополнительно активируются сигналами из таламуса, т. е. происходит еще и подготовка к приему сигналов соответствующей сенсорной карты (или карт). В результате такого резонансного взаимодействия (процесса самоорганизации) начинает идти из лобных долей в сенсорные карты обратная (отраженная) волна повышенной активации. Этот процесс уже требует большего времени — по оценкам нейробиологов около 300—500 мс и более.

*Энергетический поток, проходящий по этой объединенной коалиции нейронов, и есть осознание [7].* Отмечу, что эта коалиция осознания, по-видимому, отличается от коалиции прогнозирования для данного случая. Повышенная активация при осознании необходима, по крайней мере, для следующего: 1) выделения "главной" коалиции нейронных цепей и в результате осознания возможной корректировки действий (см. рис. 2.1, а стр. 313 [7]); 2) "отсечки", подавления второстепенных цепочек, в том числе связанных с другими маловажными в рассматриваемом случае психическими функциями. Именно для этого, как мне кажется, в основном и нужны более многочисленные связи в мозгу сверху вниз, чем снизу вверх. Это вызывает у многих нейробиологов крайнее удивление: зачем; 3) для возможной корректировки (запоминания) как сенсорных карт, так и одновременно карт целей, смыслов, действий в лобных долях. Конечно же, в зависимости от поступающей информации возможна не только "отсечка", но и взаимодействие с областями, психическими функциями, обеспечиваемыми структурами мозга, отвечающими, прежде всего, за речь, а также эмоции, моторные функции и др.

Для осуществления такой сознательной деятельности необходим определенный уровень активации, лежащий в оптимальном для каждого человека диапазоне. Если активация ниже состояния бодрствования, то нормальный человек находится в некоторых измененных состояниях сознания (ИСС) [23], например, состояниях сна. Более низкие активации характерны также для некоторых психических расстройств (деменции и др.), различных видов комы. В то же время превышение оптимального диапазона активации может приводить к приступам эпилепсии, другим расстройствам. Кроме уровня активации для прохождения этой волны по коалиции осознания, необходима также определенная степень синхронизации. Учитывая то, что области объединения лобных долей и размещения сенсорных карт находятся на относительно большом расстоянии в мозге, кроме уровня активации становятся более важными высокочастотные сигналы, характерные для гамма-волн.

Таким образом, *осознание человека — главный доминирующий процесс энергетической реконструкции в соответствующей коалиции нейронов в оптимальном диапазоне активации бодрствующего состояния нормального человека.* В данный момент времени коалиция осознания может быть в мозге только одной, что и приводит к известному феномену "бутылочного горлышка" (см., например, [13]). Конечность времен, связанных с осознанием, приводит к другому феномену — неэкономичности в целом многозадачной мыслительной деятельности [24], так как приходится переключать сознание с одной деятельности на другую (идет последовательная обработка). А это занимает около 500 мс, т. е. приводит к потере времени на переключение. Этим осознание также существенно отличается от подсознательной деятельности, характеризуемой множеством процессов, происходящих в параллель.

Схематично процесс осознания показан на рис. 2, а (стр. 313 [7]). Понятно, что он характеризуется повышенными энергозатратами. Исключениями, по-видимому, являются такие ИСС как, например, состояние "потока", медитации [23]. Еще раз подчеркну, что "сознание — бесспорно системное, интегративное свойство мозга человека" [7].

В соответствии с изложенным выше и выделяются основные составляющие "спирали" мыслительной деятельности [7], когда работает система 1 и система 2 в случае третьего смешанного режима функционирования мозга. В случае внутреннего режима работы системы 2 может быть исключена инициация действия. В то же время сама инициация мыслительных процессов, судя по всему, происходит в префронтальной коре (ПФК) (лобные доли), а далее идет чередование работ коалиций ней-

ронов прогнозирования и осознания (см. рис. 2, b, стр. 313 [7]).

Еще раз подчеркну, что здесь рассмотрены всего лишь несколько возможных вариантов мыслительной деятельности. Большое разнообразие может возникать вследствие подключения других структур мозга, регулярного обмена сигналами между различными областями, а также выхода некоторых из параллельных подсознательных процессов на уровень осознания, и наоборот, приводя к своеобразным осцилляциям, сменам в спирали мыслительной деятельности. И наконец, от индивидуальных особенностей нейронных цепей.

И тем не менее, *несмотря на возможность большого числа возможных вариантов, при обработке информации в центральной нервной системе общей закономерностью являются преобразования сигналов и энергетические реконструкции. Эту общую закономерность автор и считает главным принципом функционирования мозга.*

Рассмотрим несколько интересных и важных вопросов.

Первый вопрос: есть ли в мозге единый управляющий центр? В нейробиологии его часто образно называют "дирижером", "генеральным директором" и т. п. Обычно эти функции приписываются ПФК (лобные доли) [9, 11, 25]. В нейробиологии ведутся жаркие дискуссии на эту тему. Возражения противников, как правило нейропсихологов (см., например, [19]), основываются на том, что при поражениях ПФК нередко сознательные возможности человека страдают незначительно.

Автор разделяет точку зрения, согласно которой: 1) ПФК — объединяющий, сканирующий ситуацию центр мозга, который, как известно, имеет многочисленные связи со всеми областями мозга, а также более развитую сеть дендритов по сравнению с другими структурами, а следовательно, и опять же связей. Все это облегчает для ПФК выполнение отмеченных функций; 2) ПФК содержит фактически карты целей, смыслов, алгоритмов (по существу, это своеобразная библиотека) решений тех или иных задач, поэтому, по-видимому, окончательно формируется в мозге позже всех структур при нормальном развитии. В ПФК обнаружено много "клеток, которые ведут себя как датчики цели" [12]; 3) мозг характеризуется большой пластичностью, а следовательно, надежностью, поэтому при повреждениях некоторых участков, в том числе ПФК, утраченные функции могут на себя взять другие неповрежденные участки мозга, чему способствует разветвленная система связей в мозге. И это хорошо известно в нейропсихологии. Многое, конечно, зависит и от конкретного человека, т. е. индивидуальных особенностей нейрон-

ных цепей. Так, казалось бы похожие повреждения (опухоли, инсульты и др.) у разных людей могут приводить к самым различным последствиям [12]: у одних — к катастрофическим, а у других — к никаким. Такому поведению, по-видимому, способствует и кольцевой характер связей нейронных цепей мозга<sup>3</sup>. Важно ли в этом случае, где начало? В связи с этим интересна также информация работы [12] о том, что при решении пяти различных когнитивных задач обязательно возбуждаются не только две области в ПФК, но и одна в теменной доле.

Таким образом, ПФК является важным центром, осуществляющим объединяющие и иницирующие функции в мозге нормального человека, однако многое может зависеть от индивидуальных особенностей, вида деятельности. В частности, подобные функции на себя могут, по-видимому, брать, хотя бы частично, и другие области мозга, особенно в случаях повреждений или недоразвитости ПФК.

Второй вопрос: а что же происходит дальше? Рассмотренная волна повышенной энергетической активации, которая и составляет предмет нашего осознания, и является фактически основным содержанием так называемой рабочей памяти. Было видно, что эта волна является динамичной временно создаваемой структурой и возникает периодически в бодрствующем состоянии. Что происходит далее, а точнее, возможные варианты развития событий, неплохо установлено в нейробиологии (см., например, [9, 14]). Для более длительного запоминания информация должна попасть в гиппокамп, который перенаправляет ее в различные области мозга. "К примеру, эмоциональные воспоминания хранятся в мозжечковой миндалине, а слова записываются в височной области. В то же время цвет и другая визуальная информация собирается в затылочной доле, а тактильные ощущения и движение — в теменной. На данный момент ученые различают более 20 категорий воспоминаний, хранимых в различных частях мозга, среди них фрукты и овощи, растения, животные, части тела, цвета, числа, буквы, существительные, глаголы, имена собственные, лица, гримасы, эмоции и звуки" [14]. В результате постоянно корректируются сенсорные карты и карты ПФК в зависимости от происходящих и осознанных событий. По крайней мере, важным фактором здесь является также степень новизны, как впрочем час-

<sup>3</sup> Следует, однако, заметить, что нейронные цепи не эквивалентны даже морфологически, так как могут включать различные типы нейронов, отличающихся друг от друга даже для одного типа (см. далее).

то и непосредственно для процесса осознания в рассматриваемом случае.

## Квалиа

Интересное и поучительное мнение по этому вопросу высказал известный нейропсихолог Д. Данкан [12]: "Философы, изучающие сознание, обозначают содержание разных чувственных ощущений термином "квалиа" (qualia). Сами они причисляют квалиа к трудноразрешимым проблемам, хотя я вижу в этом некое лукавство. Ведь трудноразрешимой принято называть такую проблему, которую мы признаем сложной, но все же намереемся ее решить. Я бы предпочел называть квалиа проблемой, которая настолько одурачила нас, что мы даже не знаем, в чем ее суть".

Сущность главной проблемы психофизиологии кратко сформулировал великий русский физиолог И. П. Павлов, который задал ставший легендарным вопрос: "Каким образом материя мозга производит субъективное явление?" В то же время, каким образом мозг порождает сознание, известный современный философ Д. Чалмерс отнес к трудным проблемам [26]. Сюда же он отнес проблему "квалиа", т. е. чувственных переживаний. В целом, мнения по данному вопросу изменяются в очень широком диапазоне, начиная от полного неприятия, т. е. просто ухода от вопроса, и заканчивая тем, что он считается неразрешимым. Так что цитата, приведенная в начале, неплохо отражает современное общее состояние рассматриваемого вопроса, т. е. определенной растерянности.

Попытаемся, однако, разобраться с этой, действительно сложной, проблемой "квалиа", рассмотрев ставший классическим пример об ощущении "красного" [26].

Начнем с начала, т. е. физических основ.

"Существуют два типа фоторецепторов: колбочки и палочки... Колбочки избирательно реагируют на цвет, менее чувствительны к тусклому цвету, чем палочки, и важны для детального цветового зрения при дневном свете. Каждая колбочка содержит один из трех видов фотопигментов, специализированных белков, чувствительных к различным длинам волн света. Эти длины волн приблизительно соответствуют нашей способности различать красный, зеленый и синий цвета. Когда свет попадает на молекулу фотопигмента, энергия света поглощается, и молекула затем преобразует свою форму таким образом, что в этом фоторецепторном нейроне изменяется движение электрического тока" [9].

Что будет в случае отсутствия одного вида пигментов, в частности соответствующего красному

цвету? Ответ известен: дальтонизм, а точнее, протанопия — нарушение в красной части спектра. И ощущения "красного" цвета у такого человека не будет, т. е. красный цвет им не будет восприниматься. Что же будет видеть в этом случае человек с протанопией? Ответ: серый, т. е. другой цвет. Таким образом, редукция (катастрофическая в данном случае) произошла сразу же вследствие болезни. Понятно, что она отличается качественно от редукции в нормальном случае (см. ранее).

Нормальное для человека зрение<sup>4</sup> возможно только при наличии всех трех видов фотопигментов, условно называемых "красный", "зеленый" и "синий". Известно, что различные сочетания цветов красного, зеленого и синего диапазонов спектра позволяют видеть и другие цвета и тона (опять же вспомним цветной телевизор).

Итак, необходимым, но недостаточным, условием нормального человеческого восприятия красного цвета, прежде всего, является наличие пигментов красного. Другими необходимыми условиями восприятия красного является также нормальное развитие ряда других составляющих зрительной системы. Рассмотрим этот случай для ситуации осознанной обработки информации (см. ранее).

В нормальной зрительной системе сигналы поступают согласно описанному выше для обработки в область сенсорной карты, ответственной за цвет, в частности красный. Далее собирается сенсорная коалиция нейронов, ответственных за красный цвет и восприятие соответствующего предмета. *В конечном итоге, в результате прохождения сигналов по собранной коалиции осознания и происходит энергетическая реконструкция, которая и соответствует ощущению человека увиденного красного предмета. Отмечу, что прохождение сигналов, сборка коалиции осознания и энергетическая реконструкция происходят синхронно! Таким образом, ощущение "красного" возникает в соответствии со сформулированным главным принципом функционирования мозга — преобразований сигналов и энергетических реконструкций.*

Что влияет на формирование сенсорных карт? Очевидно, что два фактора играют решающую роль: опыт и генетика. Генетика приводит к тому, что у всех нормальных людей ощущение "красного" будет *приблизительно* одинаковым, если не будет каких-либо серьезных нарушений в приобретенном опыте. "Приблизительно" связано с этими же двумя факторами, а именно: генетикой и опы-

<sup>4</sup> Как жаль, что у нас всего лишь три вида фотопигментов, поэтому некоторые птицы и бабочки видят невидимые (не ощущаемые) для нас цвета, имея другие виды пигментов [27].

том, а точнее, с индивидуальными особенностями соответствующих нейронных цепей, которые и являются предопределяющей материальной основой субъективности [28]. Так, известно, что есть люди, которые лучше различают отличия в цветах, запахах, обладают более тонким музыкальным слухом и т. п. Будут ли эти энергетические реконструкции в мозге человека полностью соответствовать действительности? Ответ однозначный: нет! Так как любая копия, а энергетическая реконструкция и есть копия, никогда не совпадает с оригиналом. А у других видов животных? Очевидно, что эти ощущения могут еще больше отличаться в связи с возможными отличиями (см. ранее) в преобразованиях сигналов и энергетических реконструкциях в их мозге.

Таким образом, наши ощущения не полностью отражают действительность, а лишь приближенно. По мнению автора, несмотря на то что согласно сформулированному принципу функционирования мозга преобразований сигналов и энергетических реконструкций становится в общем понятно, что такое ощущения человека, их точное описание, как и сознания, — невозможно также по аналогичным причинам [7].

### **Характер обработки информации в мозге и природы жизни**

Рассмотрим несколько важных вопросов.

**Вопрос 1.** *Является ли цифровой или аналоговой обработка информации в мозге?*

Сразу же обратимся к классике. Так, еще Дж. фон Нейман писал [29]: "Самым непосредственным выводом из наблюдения за работой нервной системы является то, что ее деятельность носит *prima facie* (на первый взгляд) цифровой характер". Эти слова великого ученого привели ряд специалистов к выводу о том, что обработка информации в мозге человека носит цифровой характер. Можно лишь в этих случаях сожалеть о том, что, во-первых, невнимательно прочитано само предложение (упущено "*prima facie* (на первый взгляд)"), а во-вторых, автор порекомендовал бы все же внимательно прочесть эту легендарную книгу до конца. В частности, достаточно привести другую цитату из раздела книги "Цифровые и аналоговые части нервной системы", а именно [29]: "Я хочу сказать следующее: процессы, происходящие в нервной системе, могут многократно, как я уже отмечал, менять свой характер с цифрового на аналоговый и обратно на цифровой и т. д." Удивление и восхищение вызывает то, что свой анализ Дж. фон Нейман опубликовал в 1958 году!

Имеющиеся на настоящий момент времени сведения позволяют поддержать точку зрения Дж. фон Неймана и сделать однозначный вывод по рассматриваемым вопросам.

Будем рассматривать один из самых сложных режимов работы мозга — осознанную обработку сенсорной информации (см. ранее). Оказывается, что принципиально важные цифровые и аналоговые составляющие обработки информации в этом случае имеют место не только на микроскопическом, но и на макроскопическом уровнях.

*На микроскопическом уровне.* Можно найти много цифровых и аналоговых составляющих при анализе функционирования нейронных цепей мозга на этом уровне. Выделю всего лишь два момента. В части I [7] отмечалось, что ключевыми активными элементами в электрических (нейронных) цепях первого типа являются ионные каналы, т. е. НЭМС, работающие по принципу: открыт — закрыт, т. е. цифровому. В то же время в химических синапсах принципиально важны диффузионные процессы, т. е. реализуется явная аналоговая составляющая. При этом, как отмечалось ранее, имеют место регулярные преобразования сигналов из электрических в химические, и наоборот.

*На макроскопическом уровне.* В целом, работа системы 1 и системы 2 выглядит непрерывной (по спирали [7]). Однако переход от одной коалиции нейронов к другой (см. ранее) носит явно дискретный характер. Такими же, по крайней мере, являются смена направлений мыслительной деятельности, выход подсознательных процессов на уровень осознания, т. е. переходы от одного витка спирали к другому (см. [7]).

Следовательно, мышление является непрерывно-дискретным процессом, а обработка информации в мозге носит в целом иерархический характер, сочетающий как аналоговые, так и цифровые компоненты.

**Вопрос 2.** *Является ли цифровой или аналоговой природа жизни?*

Этот вопрос — более общий, чем связанный с ним рассмотренный, более частный вопрос 1. Попробуем ответить и на этот вопрос, так как в настоящее время он вызывает все больший интерес (см., например, [30]).

"Центральная догма молекулярной биологии гласит о том, что информация в клетке идет от ДНК через РНК к белку, и более никак" [9]. Известно также следующее высказывание Р. Докинза: "Если суммировать молекулярную генетику одним словом, я бы сказал "цифровая"" [31]. Подобные взгляды приводят специалистов к популярному в настоящее время выводу о том, что природа жизни — цифровая.

Опять же обратимся к классике — легендарной книге Дж. фон Неймана, а именно [29]: "Сами гены, очевидно, являются частями цифровой системы компонентов. Однако их действия состоят в стимулировании образования особых химических веществ, а именно определенных энзимов, свойственных данному гену, и поэтому принадлежат к аналоговой области". Сегодня можно усилить и эту точку зрения великого ученого с привлечением установившегося научного направления, в частности эпигенетики. "Эпигенетика: изучение экспрессии генов под влиянием окружающей среды. Открытие альтернативных описанным в центральной догме путей передачи информации иногда называется третьей биологической революцией" [9].

Следовательно, и в этом вопросе аналоговая составляющая, связанная с влиянием окружающей среды, имеет принципиальное значение.

В качестве последнего аргумента отмечу следующее. Согласно самой мощной современной физической теории — квантовой механике — хорошо известно, что возможны три вида спектров физической величины, а именно: 1) дискретный; 2) состоящий из отдельных полос; 3) непрерывный. Этим квантовая механика коренным образом отличается от классической физики, в которой допускается только непрерывный вид спектра. Поэтому автор считает, что Природа, реализуя жизнь, в том числе человека, использовала все богатство возможностей.

По изложенным причинам окончательный и однозначный ответ на два поставленных вопроса: *"Характер как обработки информации в мозге человека, так и природы жизни — общий, т. е. аналого-цифровой!"*

Рассмотренные вопросы имеют принципиальное значение, по крайней мере, для двух очень интересных проблем: бессмертия и создания сверхума.

В части I [7] отмечалось, что копирование сознания человека может рассматриваться как своеобразный вариант его бессмертия. Из предыдущего становится понятно, что копии сознания целесобразно делать на аналого-цифровой (смешанной или гибридной) основе. Что же касается создания сверхума (см. [23]), то, по-видимому, и здесь основной должна быть аналого-цифровая, т. е. гибридная электроника. Не исключено, что так же как и мозг человека, это будет органическая гибридная наноэлектроника [1—6].

### Проблемы и направления исследования сознания

Основные проблемы исследования мозга человека в целом, сознания в частности, прежде

всего, являются следствием его фантастического уровня интеграции как объекта электроники. В части I [7] была дана весьма грубая оценка — около  $10^{19} \dots 10^{21}$  активных элементов, а именно: числа каналов  $M$ , т. е. НЭМС. К сожалению, на настоящий момент времени можно уверенно указать лишь диапазон, в котором может находиться это число:

$$10^{15} \ll M \ll 10^{25}, \quad (1)$$

где нижний предел соответствует приблизительно числу синапсов (известно, что число каналов гораздо больше числа синапсов), а верхний предел — общему числу молекул в мозге человека (объем мозга — около  $10^3 \text{ см}^3$ , а число молекул на  $1 \text{ см}^3$  — около  $10^{22}$ ). Отмечу, что только недавно определено приблизительно среднее число нейронов  $N$  в мозге нормального взрослого человека, т. е. решена более простая задача. Оно варьируется по разным источникам в диапазоне  $(86,1 \pm 8,1) \cdot 10^9$  [32]. Приблизительно столько же  $(85,0 \dots 86,0) \cdot 10^9$  глиальных клеток [10, 33]. Таким образом, речь идет о числе  $N \approx 10^{11}$ . Однако замечу, что в то же время даже неизвестно число типов нейронов, которых по оценкам, "несомненно, больше сотни, а может быть, и больше тысячи" [34]. Более того, "нет двух совершенно одинаковых нейронов" [34]. С синапсами ситуация сложнее (обычно указывается диапазон  $10^{14} \dots 10^{15}$ ). Автор уже не обсуждает вопрос о числах дендритов, шипиков, а также морфологических (топологических) особенностях нейронных цепей. В связи с изложенным крайне сложно анализировать объект электроники, в котором неизвестны даже числа основных структур, а в то же время они по-настоящему астрономические. При этом не вызывает сомнения, что режимы работы мозга, в которых реализуется осознание, являются самыми сложными (см. [7] и ранее). Не следует забывать о возможности множества отличающихся вариантов, даже в одних и тех же режимах функционирования мозга. Бесспорно усложняет ситуацию и то, что мы имеем дело в мозге с реконструкциями, а не действительностью. Как исследовать объект такой фантастической сложности со столь значительными неопределенностями? *Таким образом, мы имеем дело с задачей грандиозной степени сложности при исследовании сознания человека. Как уже отмечалось, точное ее решение получить невозможно.*

Тем не менее, попытаемся ответить на вопрос: что надо сделать, чтобы достичь более адекватного понимания сознания?

Анализ позволяет выделить следующие основные направления.

Во-первых, уже отмечалось, что наиболее перспективными для дальнейшего развития являются эмпирические теории сознания. Поэтому перво-степенное значение имеют более глубокие исследования в нейробиологии (нейрофизиологии, нейропсихологии и др.) и нейронауках в целом. К сожалению, исследования на настоящий момент времени часто характеризуются отрывочностью, неполнотой, противоречивостью, а также основываются на частных, обычно статистически недостоверных, данных для конкретных людей в небольшой период времени. В то же время хорошо известно, что мозг человека является динамичной, постоянно изменяющейся структурой. Остался еще ряд серьезных неясных вопросов в работе мозга. В частности, роли глиальных клеток в обработке информации. Для автора понятно, что они оказывают влияние на функционирование мозга, так как важны для работы синапсов. Насколько важно это влияние? Не совсем ясен вопрос с нейрогенезом — пластичностью мозга высшего уровня [35]. Мне кажется, что эти и многие другие вопросы (см., например, [9]) могут преподнести немалые сюрпризы в понимании функционирования мозга.

Во-вторых, практически все современные методы и средства экспериментальных исследований мозга (визуализации), к сожалению, носят косвенный характер и достаточно грубы, что отмечалось многими специалистами. Так, детальный анализ современных методов визуализации мозга дан в работе [9]. Вердикт неутешительный: "...ни один метод не обладает необходимым пространственно-временным разрешением для прослеживания единичных нейронов и даже небольших групп нервных клеток, например колонок в коре" [9]. Поэтому необходимо использовать целый набор методов, что не всегда возможно и усложняет анализ. Используемый для исследования сознания метод интроспекции является в общем-то косвенным методом и имеет также ряд серьезных недостатков. Наиболее существенным из которых является то, что исследуемый процесс и сообщение о нем не только разделены во времени, но и то, что при сообщении могут быть задействованы уже другие области по сравнению с участвующими в исследуемом процессе, а также влияние могут оказывать подсознательные процессы. Все это вместе может приводить к искажениям, и в конечном итоге к артефактам, что отмечалось, в частности, в работе [13]. В основном также исследуется процесс зрительного осознания. Очевидно, что существенные отличия могут возникать в других видах осознания. Все это требует очень тщательной интерпретации получаемых результатов, разработки специальных методов обработки информации. *Перспективу для*

*качественного улучшения экспериментальных методов исследования мозга автор видит, прежде всего, в использовании нанoeлектроники, наноматериалов, нанотехнологий и наноаук в целом [28]. Это тем более важно, что при создании мозга Природа интенсивно использовала нанообъекты [28]: гены, ДНК, РНК, нейромедиаторы, белки и др., а сам мозг — объект органической гибридной нанoeлектроники.*

В-третьих, учитывая косвенный, приближенный характер всех методов экспериментальных исследований мозга, необходимы серьезные усилия по развитию теорий сознания, соответствующих методов математического моделирования. Согласно анализу современного состояния развития понимания сознания, по-видимому, приоритет должен быть отдан эмпирическим теориям. Именно они, судя по всему, правильно описывают хотя бы некоторые аспекты сознания. Не будем, однако, забывать о большом разнообразии сознательной деятельности, исключительной степени сложности задачи (см. ранее). Для математического моделирования перспективу представляет разработка многоуровневых схем и реализующих их систем, один из вариантов которых описан в работах [1, 2] в рамках предположений полной электронной интерпретации функционирования мозга. Важным в этом случае является свойство открытости подхода, возможность учета влияния различных факторов, объединения с другими подходами [28]. Так как основными активными элементами в мозге, как объекте электроники, являются каналы, т. е. НЭМС, то использование сложных квантово-механических методов, по крайней мере на нижних иерархических уровнях, будет обязательным [1, 2]. В любом случае необходимо учитывать, что рассматриваемая проблема относится к труднорешаемым задачам класса NP в математическом смысле [1, 2]. Учитывая грандиозные числа нейронов  $N$  и НЭМС  $M$  в мозге человека, перспективным будет также развитие статистических методов анализа [1, 2] и синергетического подхода [36]. *Вследствие сложившейся ситуации важным направлением следует считать разработку комплексных подходов исследования мозга [1, 2] на основе использования как отличающихся экспериментальных методов, так и разнообразных методов математического моделирования. При этом можно привлекать различные теории функционирования мозга.*

И последнее, несмотря на важность исследования сознания человека для самых различных областей науки, техники и другой деятельности, не следует забывать, что приоритетное направление — возможность восстановления сознания у людей, которые его теряют или уже потеряли. К сожалению, успехи здесь крайне незначительны. Опреде-



ленные надежды в настоящее время подают комплексные эмпирические методики, например протокол ReCODE для лечения болезни Альцгеймера [37] и некоторые другие методики восстановления ряда функций мозга [38, 39]. Важным в этом направлении должен быть обязательный учет особенностей пациента, т. е. индивидуального характера нейронных цепей и других отличий его мозга от нормы. Особую перспективу автор и здесь видит в использовании возможностей нанoeлектроники, наноматериалов, нанотехнологий и нанонаук в целом [28]. Главным нашим союзником в этом самом трудном направлении исследования будет удивительная пластичность мозга, т. е. он сам [28].

## Заключение

Более детальный анализ процесса осознанной обработки сенсорной информации позволил сформулировать главный принцип функционирования мозга — преобразования сигналов и энергетических реконструкций. На этой основе проанализирован один из самых трудных вопросов, обычно связываемых с сознанием, — квалиа, т. е. чувственных ощущений человека. Показано, что чувственные ощущения являются энергетическими реконструкциями в мозге человека при восприятии соответствующих объектов. Как и любые другие копии, они не могут полностью соответствовать действительности.

Рассмотрены широко дебатлируемые в литературе вопросы о характерах обработки информации в мозге и природы жизни. Из трех возможных вариантов для каждого из вопросов приведены аргументы в пользу того, что этот характер и в том и в другом случаях — общий, а именно: аналого-цифровой. Отмечено, что эти вопросы имеют принципиальное значение для двух проблем: искусственного бессмертия и создания сверхума.

Выделены основные проблемы и перспективы исследования сознания человека. Подчеркнуто, что они, главным образом, определяются фантастическим уровнем интеграции мозга как объекта органической гибридной нанoeлектроники.

Основная ошибка при создании многих теорий сознания, судя по всему, заключалась в поиске некоторой стандартной схемы его реализации. По мнению автора, в действительности ее просто нет, а вот главный принцип функционирования мозга есть, а именно: преобразования сигналов и энергетических реконструкций. В целом, работа мозга характеризуется огромным разнообразием. Главным же недостатком и одновременно достоинством мозга, пожалуй, является то, что он приблизительно отражает действительность. Поэтому нельзя

смотреть на мозг как на стандартный объект, основываясь при этом на некоторых отрывочных частных данных. Индивидуальность здесь принципиально важна, несмотря на общие принципы построения мозга, по крайней мере, нормальных людей. Вместе с тем, очевидно, что это и не могло быть иначе, учитывая фантастический уровень интеграции мозга как объекта электроники, а также особенности мозга каждого человека. По изложенным причинам ни сознание, ни квалиа не могут быть, к сожалению, описаны и проанализированы точно, а может быть... к счастью!

*Автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю признательность моим ученицам Н. В. Коломейцевой, И. А. Романовой и И. Ю. Щербаковой за подготовку рукописи работы к печати.*

## Список литературы

1. **Абрамов И. И.** Мозг как объект электроники. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 80 с.
2. **Abramov I. I.** Brain as an object of electronics. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 76 p.
3. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной нанoeлектроники, или взгляд со стороны. Часть I // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 1. С. 52—54.
4. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной нанoeлектроники, или взгляд со стороны. Часть II // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 3. С. 45—53.
5. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной нанoeлектроники, или взгляд со стороны. Часть III // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 5. С. 45—54.
6. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной нанoeлектроники, или взгляд со стороны. Часть IV // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 6. С. 49—53.
7. **Абрамов И. И.** Сознание человека, или возможности электроники. Часть I // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 5. С. 308—320.
8. **Николс Дж. Г., Мартин А. Р., Валлас Б. Дж., Фукс П. А.** От нейрона к мозгу. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 672 с.
9. **Cognition, brain, and consciousness.** Introduction to cognitive neuroscience. Second Edition / Ed. by B. J. Vaars, N. M. Gage. Amsterdam: Elsevier, 2010. 658 p.
10. **Газзанига М.** Кто за главного? Свобода воли с точки зрения нейробиологии. М.: Изд-во АСТ: CORPUS, 2017. 368 с.
11. **Голдберг Э.** Управляющий мозг: Лобные доли, лидерство и цивилизация. М.: Смысл, 2003. 335 с.
12. **Данкан Д.** Где рождается интеллект. М.: Карьера Пресс, 2015. 256 с.
13. **Деан С.** Сознание и мозг. Как мозг кодирует мысли. М.: Карьера Пресс, 2018. 416 с.
14. **Kaku M.** The future of the mind: the scientific quest to understand, enhance, and empower the mind. New York: Doubleday Publishers, 2014. 400 p.
15. **Revonsuo A.** Consciousness. The science of subjectivity. Hove and New York: Psychology Press, Taylor & Francis Group. 2010. 324 p.
16. **Абрамов И. И.** Мозг человека — шедевр естественной электроники. Проблемы и перспективы исследования // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. "Актуальные про-

блемы радио- и кинотехнологий", 2017, Россия, Санкт-Петербург. С. 79–86.

17. **Лурия А. Р.** Лекции по общей психологии. СПб.: Питер, 2007. 320 с.

18. **Батуев А. С.** Физиология высшей нервной деятельности и сенсорных систем: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2010. 317 с.

19. **Дамасио А.** Так начинается "я". Мозг и возникновение сознания. М.: Карьера Пресс, 2018. 384 с.

20. Мозг человека. Как это работает / под общ. ред. П. Абрахамса. М.: Изд. АСТ, 2016. 176 с.

21. **Рамачандран В. С.** Мозг рассказывает. Что делает нас людьми. М.: Карьера Пресс, 2012. 422 с.

22. **Кандель Э.** В поисках памяти: Возникновение новой науки о человеческой психике. М.: Астрель: CORPUS, 2012. 736 с.

23. **Абрамов И. И.** Сознание человека, или возможности электроники. Часть II // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 6. С. 368–384.

24. **Компернолле Т.** Мозг освобожденный: Как предотвратить перегрузки и использовать свой потенциал на полную мощь. М.: Альпина Паблишер, 2015. 571 с.

25. **Лурия А. Р.** Основы нейропсихологии. М.: Изд-во МГУ, 1973. 375 с.

26. **Чалмерс Д.** Сознательный ум: В поисках фундаментальной теории. М.: УРСС: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2013. 512 с.

27. **Кэрролл Ш.** Приспособиться и выжить! ДНК как летопись эволюции. М.: Изд-во АСТ: CORPUS, 2015. 384 с.

28. **Абрамов И. И.** Перспективы использования наноэлектроники, наноматериалов и нанотехнологий в исследо-

вании и медицине мозга человека // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 1. С. 49–64.

29. **Нейман Дж.** Вычислительная машина и мозг / Кибернетический сб. Вып. 1. М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. С. 11–60.

30. **Жизнь.** На переднем крае эволюционной биологии, генетики, антропологии и науки об окружающей среде / Под ред. Дж. Брокмана. М.: Изд-во АСТ, 2018. 384 с.

31. **Будущее** науки в XXI веке. Следующие пятьдесят лет / Под ред. Дж. Брокмана. М.: АСТ: АСТ МОСКВА, 2008. 255 с.

32. **Бостром Н.** Искусственный интеллект. Этапы. Угрозы. Стратегии. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2016. 496 с.

33. **Худ Б.** Иллюзия "Я", или Игры, в которые играет с нами мозг. М.: Эксмо. 2015. 384 с.

34. **Хьюбел Д.** Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990. 239 с.

35. **Кемперманн Г.** Революция в голове. Как новые нервные клетки омолаживают мозг. М.: Азбука-Аттикус, Ко-Либри, 2018. 272 с.

36. **Хакен Г.** Принципы работы головного мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности. М.: ПЕР СЭ, 2001. 351 с.

37. **Бредсен Д.** Нестареющий мозг: глобальное медицинское открытие об истинных причинах снижения умственной активности, позволяющее обрести ясность ума, хорошую память и спасти мозг от болезни Альцгеймера. М.: Эксмо, 2019. 304 с.

38. **Амен Д.** Измените свой мозг — изменится и жизнь! М.: Эксмо, 2014. 448 с.

39. **Перлмуттер Д., Колман К.** Здоровый мозг: Программа для улучшения памяти и мышления. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2017. 352 с.

---

**I. I. Abramov**, D. Sci., Professor, nanodev@bsuir.edu.by,  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus

*Corresponding author:*

**Abramov Igor I.**, D. Sci., Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus, nanodev@bsuir.edu.by

## Human Consciousness, or Possibilities of Electronics. Part III

*Received on April 22, 2019*

*Accepted on May 20, 2019*

*The phenomenon of "human consciousness" is considered on the basis of the full electronic interpretation of brain functioning proposed earlier. In the third part of the work, the basic principle of the brain functioning — signal transformations and energetic reconstructions — is formulated as a result of a more detailed analysis of the process of conscious processing of sensory information; concept of "qualia", the nature of information processing by the brain, the nature of life, main problems and trends of consciousness research are also considered.*

*In particular, the mode of conscious processing of sensory information was analyzed on the basis of considering a more complete system: "the brain — other components of the nervous system — the body — the environment". As a result, the main principle of brain functioning was formulated, namely: signal transformations and energetic reconstructions. Another difficult problem — "qualia", i.e. of sensual sensations (experiences), is considered on the basis of the formulated principle. It is shown that sensory sensations are energetic reconstructions occurring in the human brain when perceiving relevant objects, that is, they are material, like thought and other mental functions. As a result of the consideration of the nature of information processing in the brain and the nature of life, it is argued that this nature in both cases is common, namely analog-digital. In conclusion, the main problems and trends of human consciousness research are highlighted. It is noted that they are determined mainly by the fantastic level of integration of the human brain as an object of organic hybrid nanoelectronics.*

**Keywords:** human consciousness, brain, full electronic interpretation, nanoelectronics

*For citation:*

**Abramov I. I.** Human Consciousness, or Possibilities of Electronics. Part III., *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 9, pp. 555–574.

DOI: 10.17587/nmst.21.555-574

## Conscious processing of sensory information

Consider first one of the most difficult modes of the brain — conscious processing of sensory information. According to the proposed full electronic interpretation of brain function [1–6], this is one of the variants of the mixed (third type) modes of the brain. Let us try to clarify what happens in this case, since in Part I [7], in essence, the dominant process in the work of consciousness is considered. In addition to the noted principles in Part I [7], modern information from neuroscience, primarily neurobiology (see, for example, [8–14]), was also used as a basis, as well as being used to construct empirical theories of consciousness (a good overview is given in textbook [15]), namely: the global workspace theory (Baars); the theory of the neural global workspace (Dehaene et al.); the neurobiological theory (Crick and Koch); the theory of the dynamic core (Tononi and Edelman); the information integration theory (Tononi); the recurrent processing theory (Lamme); the theory of consciousness as the feeling of what happens (Damasio) and others. From the author's point of view, empirical theories of consciousness represent the greatest perspective for further development, since they are based on a serious scientific basis (data from neurobiology, neuroscience in general), and not fantasies, i.e. we will continue to analyze the phenomenon of "human consciousness" in accordance with the principle of "Occam's razor" [7].

When detailing the process of conscious processing of sensory information, strictly speaking, it is necessary to analyze the complete system, namely [7, 16]: the brain — the other components of the nervous system — the body — the environment. Part I [7] noted that, unfortunately, only an approximate consideration of the phenomena occurring in the complete system is possible, so we analyze what is happening at least as a whole at each of the main stages of the processing process.

*Transformations* of information begin from the very beginning of the process after the signals from the external environment and from the internal organs reach the receptors of the sensory systems. It is known that receptors, as a rule, are designed to accept one type of signals. At the same time, signals entering the body, including receptors, can be very diverse [1, 2]: mechanical, optical, thermal, chemical, electrical, etc. In addition, one should not forget that the location of the receptors on the human body is of discrete nature. In this regard, the *reduction* and *decomposition* of incoming information from the environment and internal organs are carried out immediately. For example, it is known that for the preprocessing of electromagnetic waves, receptors are used (more precisely, photopigments, see below), which are sensitive only to three regions of the

wavelengths of the optical range, approximately corresponding to a person's ability to distinguish between red, green, and blue.

So, when does the processing of information begin? The answer is obvious: right away. This is especially well understood by the example of electromagnetic waves, since a person perceives only a narrow spectrum of waves in the optical range. Does the body affect this process? The answer is less obvious, but still: of course. This is primarily due to the fact that the receptors of sensory systems are located in the human body, and therefore, they can be influenced, for example, by changes in body temperature, diseases, chemical processes and their changes, etc. It should also be particularly noted that the sensitivity of the lower thresholds of sensations from various factors leading to both increasing and decreasing sensitivity, for example, depending on the brightness of the light, individual differences, psychological, i.e. reverse, influence, interaction of sensations, and many others (see, for example, [17]).

Thus, when processing sensory signals, it is necessary to take into account the influence of both the environment, which is obvious, since the incoming signals come from it and the body. Therefore, an ever more pervasive opinion, especially among neurobiologists, about the need to take into account the body influence on the human mind should not come as a surprise.

As a result of the receipt of information from the external environment and from internal organs, its decomposition into external and internal sensory systems occurs, the principles of which are well described in the textbook [18]. After the initial processing, as a rule, the stimulus of the corresponding modality *is converted* into electrical signals. And then these signals are distributed through the nervous system with constant transformations from electrical to chemical (for example, in chemical synapses) signals, and vice versa. Since in this process of information transfer, various channels (ionic, etc., i.e. nanoelectromechanical systems (NEMS)) are of fundamental importance [7], then mechanical processes also have an effect. In other words, when transmitting information for further processing to the main information center of a person, i.e. the brain, there is a constant conversion of signals, and therefore, their changes (transformations), that is, generally speaking, pre-processing of information continues.

After such *numerous transformations* (reduction, decomposition, conversion, etc.) of signals, what should the brain do to reflect reality (in accordance with the principle of reflection of higher nervous activity noted in Part I [7])? It has to put it all together, i.e. make a *reconstruction* of reality in the very same brain! It simply

has no other place. How the brain does it? Let us try to understand this for the processing of sensory information using current and previously noted information from neuroscience.

The most interesting thing is that after the receipt of such *disassembled information* into the brain, the transformation continues, i.e. a thorough reconstruction is still far away. In the future, to simplify the analysis, we will conduct the consideration in accordance with the full electronic interpretation of brain function, i.e. to consider neural circuits as electrical circuits of the first type along which electrical signals propagate [1, 2, 4, 7].

For conscious processing of sensory information, three *major* brain structures are of primary importance: the trunk, the thalamus and the cortex. Immediately, I note that other brain structures can also have an effect in the performance of various mental functions, including consciousness. This is also due to the fact that the brain is characterized by duplication in the work of neural circuits. It is necessary to ensure the *reliability* of the brain. In addition, there is a constant exchange of information (signals) between different areas of the brain, neural circuits, and neurons. And all this can be important! In this regard, it is permissible to talk only about key structures, main processes. The noted features of the brain work lead to numerous possible variants of the brain performing even seemingly the same mental functions. Therefore, in the following, we consider only a few possible options for processing sensory information, which, however, will make it possible to single out the basic regularity, characteristic features, and dominant processes.

The brain stem, apparently, is important to maintain the required level of activation of brain structures, corresponding to the state of wakefulness. It is also important to exchange information (signals) with the cerebral cortex passing through the thalamus, i.e. roundtrip. The cortex, along with the thalamus, thus regulates the activity of the trunk, maintaining the state of wakefulness as a result of cooperative work. The key value directly for conscious processing of sensory information, as is commonly believed in neurobiology (see, for example, [9]), is played by the thalamocortical system (thalamus and cerebral cortex). The well-known neurobiologist A. Damasio, however, believes that "the very first manifestations of the psyche arise in the brainstem" [19]. Of course, much depends on what is meant. As was shown earlier, information processing begins from the very beginning of the process.

The received disassembled information about the environment and the body in the brain is further distributed by the thalamus (a kind of "switch", as it is often figuratively called in neurobiology) on the maps of

the corresponding sensor systems<sup>1</sup>: visual, auditory, tactile, gustatory. The only exception is odor information (olfactory system) [12]. It hits the map bypassing the thalamus. Therefore, the following types of "memory: visual, auditory, olfactory, gustatory and tactile" are distinguished [20]. Sensory maps are areas of the cerebral cortex in which relevant information is stored in a disassembled form as a result of the hierarchical processing carried out earlier, and, apparently, partially laid down genetically. At present, in general, the areas of the brain (normally functioning) in which the maps are located (see, for example, [9]) are defined.

For further consideration, it is important for us to note the following: "The back part of the cortex contains areas of projections of the main sense organs: sight, hearing, touch, smell and taste. On the contrary, the front part includes the regulation of actions, planning, some functions of working memory, speech and the like" [9].

Thus, maps of sensory systems and maps of goals, meanings are divided in the brain significantly. At the same time, maps of sensory systems are located in different areas of the cerebral cortex.

At first, specialists were extremely surprised by the following: "the brain uses the same areas to imagine a scene and see it in reality" [21]. Now this point of view is recognized by many neuroscientists (see, for example, [9, 22]). Consequently, in the processing of incoming sensory information, a *hierarchical assembly* of information occurs as a result of the passage of electrical signals through neural circuits of the corresponding region of the cortex. *This suggests that from the disassembled information received and previously deposited (encoded), not only old information can be reproduced as a result of the passage of electrical signals (decoding), but also, which especially impresses, the newly received information, i.e. new!* Thus, there is a flexible assembly of newly received information from a wide variety of fragments<sup>2</sup>. This *reconstructed* information, unfortunately, is scattered by brain maps, i.e. it is necessary to continue to unite it, but in a single whole.

What are such at first sight seeming difficulties needed for? The main point of this is the need for extremely economical storage of information, both for memorizing and reproducing old and new information, i.e. saving the available resources of the cerebral cortex, which, unfortunately, are limited, and at the same time,

<sup>1</sup> A more detailed breakdown into sensor systems is given in [18]. And in this case, however, we can talk about the corresponding maps.

<sup>2</sup> Recall the pixels in the TV screens and other devices. In the brain, however, this is much more sophisticated, since it is obvious that there is no screen in it, and indeed reproducing devices similar to traditional electronics. Everything is made more universal and more interesting.

the brain must and can work reliably for decades. Consequently, we are talking about certain, fairly universal mechanisms for processing information using electric (neural) circuits of the first type after it has been pre-processed at the entrance to the corresponding sensory systems. As a result of the reactivation of the corresponding neural circuits of the maps of the sensory systems, coalitions are actually assembled (let's call them *the coalitions of the neurons of the sensory maps*) responsible for the reconstruction of certain memories and/or reality. The case of "and" may correspond to hallucinations initiated from outside.

Further more interesting happens. Information from sensory maps enters the frontal lobes for integration into a single whole. And here there are many different options. In this regard, we consider only some of the characteristic.

Suppose you are walking down the street. Usually, everything happens in an automatic (at a subconscious level) mode, i.e. system 1 is working [7]. In fact, the signals passing through the combined coalition of neurons are planning (modeling or prediction) of the situation [7] (let's call the union of neurons in this case a *planning or prediction coalition*), and then the action is initiated (see fig. 1, p. 313 [7]) and signaling the relevant systems for execution. I note that according to the neuroscience data, the action *maps* are located nearby, i.e. also in the frontal lobe, which leads to saving interaction time. So actually, a subconscious action takes place in this case with a significant time saving, which can be important. Neuroscientists estimate that such actions require about 100 ms [9].

However, the most interesting thing happens in another case. Suppose that a coalition of neurons, at least one of the sensory systems, signals danger. For example, you saw something dangerous in the process of walking down the street. In this situation, there is an increase in activation and exceeding the threshold of awareness, which may depend on many factors, as well as a kind of resonance with the maps of goals, meanings in the frontal lobes. It is known that "in the waking state the prefrontal cortex is the most active" [20], i.e. as if in standby mode, a kind of scanning of the situation. It is possible that the corresponding areas (subregions) of the frontal lobes are additionally activated by signals from the thalamus, i.e. there is also preparation for receiving signals from the corresponding sensor map(s). As a result of this resonant interaction (the process of self-organization), the reverse (reflected) wave of increased activation begins to go from the frontal lobes to the sensory maps. This process already requires more time — according to neuroscientists, about 300...500 ms and more.

*The energy flow passing through this united coalition of neurons is awareness* [7]. I note that this *coalition of*

*awareness*, apparently, differs from the coalition of prediction for this case. Increased activation in awareness is necessary, at least, for the following: 1) the selection of the "main" coalition of neural circuits and as a result for the realization of possible corrective actions (see fig. 2.1, *a*, and p. 313 [7]); 2) "cutoffs", suppression of secondary chains, including those associated with other mental functions that are of little importance in the case under consideration. It is for this purpose, as it seems to me, that more numerous connections in the brain are needed from the top down than from the bottom up. Many neuroscientists are extremely surprised by this: why; 3) for the possible correction (memorization) of both sensory maps, and simultaneously maps of goals, meanings, and actions in the frontal lobes. Of course, depending on the incoming information, not only a "cutoff" is possible, but also interaction with areas, mental functions provided by brain structures that are primarily responsible for speech, as well as emotions, motor functions, etc.

To carry out such a conscious activity, a certain level of activation is needed, which lies in the optimum range for each person. If the activation is below the waking state, then the normal person is in some altered states of consciousness (ASC) [23], for example, sleep states. Lower activations are also characteristic of some mental disorders (dementia, etc.), various types of coma. At the same time, exceeding the optimal range of activation can lead to epileptic seizures and other disorders. In addition to the level of activation, a certain degree of synchronization is also necessary for the passage of this wave through a coalition of awareness. Considering the fact that the regions of the frontal lobes and the placement of sensory maps are located at a relatively large distance in the brain, in addition to the level of activation, high-frequency signals characteristic of gamma waves become more important.

Thus, *human awareness is the main dominant process of energetic reconstruction in the corresponding coalition of neurons in the optimal range of activation of the waking state of a normal person*. At this point in time, a coalition of awareness can be only one in the brain, which leads to the well-known "bottleneck" phenomenon (see, for example, [13]). The finiteness of the times associated with awareness leads to another phenomenon — the inefficiency of the whole multitasking mental activity [24], since one has to switch consciousness from one activity to another (there is a sequential processing). And it takes about 500 ms, i.e. leads to loss of time to switch. Thus awareness is also significantly different from the subconscious activity, characterized by a variety of processes occurring in parallel.

Schematically, the process of awareness is shown in fig. 2, *a* (p. 313 [7]). It is clear that it is characterized

by increased energy consumption. Exceptions, it seems, are such ASCs as, for example, the state of "flow", meditation [23]. Once again, "consciousness is, undoubtedly, a systemic, integrative property of the human brain" [7].

In accordance with the above, the main components of the "spiral" of mental activity [7] are highlighted when system 1 and system 2 work in the case of the third mixed mode of brain functioning. In the case of an internal mode of operation of system 2, the initiation of an action can be excluded. At the same time, the very initiation of mental processes, apparently, occurs in the prefrontal cortex (PFC) (frontal lobes), and then comes the alternation of coalitions of neuron prediction and awareness (see fig. 2, b, p. 313 [7]).

Once again, here are just a few possible options for thinking. A great variety can arise due to the connection of other brain structures, regular exchange of signals between different areas, as well as the exit of some of the parallel subconscious processes to the level of awareness, and vice versa, leading to peculiar oscillations, changes in the spiral of mental activity. And finally, due to the individual characteristics of neural circuits.

*And yet, despite the possibility of a large number of possible options, while processing of information in the central nervous system, the regularity is the signal transformations and energetic reconstructions. The author regards this regularity as the basic principle of the brain functioning.*

Consider some interesting and important issues.

The first question: is there a single control center in the brain? In neuroscience, it is often figuratively called the "conductor", "CEO", etc. Usually these functions are attributed to PFC (frontal lobes) [9, 11, 25]. In neuroscience, there are heated discussions on this topic. The objections of opponents, as a rule, by neuropsychologists (see, for example, [19]), are based on the fact that, in cases of PFC lesions, the conscious possibilities of a person often suffer only slightly.

The author shares the point of view according to which: 1) PFC — the center of the brain uniting and scanning the situation, which, as is well known, has numerous connections with all areas of the brain, as well as a more developed network of dendrites compared to other structures, and therefore, again connections. All this makes it easier for PFC to perform the marked functions; 2) PFC actually contains maps of goals, meanings, algorithms (essentially, this is a kind of library) of solutions of various tasks, therefore, it seems that it is finally formed in the brain after all structures during normal development. In PFC, many "cells that behave as sensors of the target" have been detected [12]; 3) the brain is characterized by high

plasticity and, therefore, reliability, therefore, in the event of damage to some areas, including PFC, other intact brain areas can assume lost functions, which is facilitated by an extensive system of connections in the brain. And this is well known in neuropsychology. Much, of course, depends on a particular person, i.e. individual characteristics of neural circuits. So, it would seem that similar injuries (tumors, strokes, etc.) in different people can lead to very different consequences [12]: for some people — to catastrophic, and for others — to none. This behavior, apparently, contributes to the ring nature of the connections of the neural circuits of the brain<sup>3</sup>. Is it important in this case, where is the beginning? In this connection, the information from work [12] that, when solving five different cognitive tasks, not only two areas in the PFC, but also one in the parietal lobe, are necessarily excited, is also interesting.

Thus, PFC is an important center that performs unifying and initiating functions in the brain of a normal person, but much can depend on individual characteristics, type of activity. In particular, such functions may, apparently, take, at least partially, other areas of the brain, especially in cases of damage or underdevelopment of PFC.

The second question: what happens next? The considered wave of increased energy activation, which is the subject of our awareness, is actually the main content of the so-called working memory. It was evident that this wave is a dynamic temporarily created structure and occurs periodically in the waking state. What happens next, or rather, possible scenarios, is well established in neurobiology (see, for example, [9, 14]). For longer memorization, the information must fall into the hippocampus, which redirects it to different areas of the brain. "For example, emotional memories are stored in the amygdala, and words are recorded in the temporal lobe. At the same time, color and other visual information is collected in the occipital lobe, and tactile sensations and movement are in the parietal lobe. At the moment, scientists distinguish more than 20 categories of memories stored in various parts of the brain, including fruits and vegetables, plants, animals, body parts, colors, numbers, letters, nouns, verbs, proper names, faces, grimaces, emotions and sounds "[14]. As a result, sensory maps and PFC maps are constantly adjusted, depending on the occurring and conscious events. At least, an important factor here is also the degree of novelty, as well as often and directly for the process of awareness in this case.

<sup>3</sup> It should be noted, however, that neural circuits are not even morphologically equivalent, since they can include different types of neurons that differ from each other even for the same type (see below).

## Qualia

An interesting and instructive opinion on this issue was expressed by the well-known neuropsychologist J. Duncan [12]: "Philosophers who study consciousness designate the content of various sensory sensations by the term qualia. They themselves consider qualia as hard problems, although I see this as something cunning. Indeed, it is customary to call a hard one such a problem, which we recognize as difficult, but still intend to solve it. I would prefer to call qualia a problem that so fool us that we don't even know what its essence is."

The essence of the main problem of psychophysiology was briefly formulated by the great Russian physiologist I. P. Pavlov, who asked the legendary question: "How does brain matter produce a subjective phenomenon?" At the same time, how the brain generates consciousness, the well-known modern philosopher D. Chalmers attributed to hard problems [26]. Here he took the problem of "qualia", i.e. sensual experiences. In general, opinions on this issue vary in a very wide range, ranging from total rejection, i.e. just avoiding the question, and ending up being considered unsolvable. So the citation given at the beginning quite well reflects the current general state of the issue in question, i.e. a certain confusion.

Let us try, however, to deal with this, really difficult, problem of "qualia", having considered the classic example about the sensation of "red" [26].

Let's start from the beginning, i.e. physical fundamentals.

"There are two types of photoreceptors: the cones and the rods... Cones selectively react to color, less sensitive to dull color than rods, and important for detailed color vision in daylight. Each cone contains one of three types of photopigments, specialized proteins, sensitive to different wavelengths of light. These wavelengths roughly correspond to our ability to distinguish between red, green, and blue. When light hits a photopigment molecule, the light energy is absorbed, and the molecule then develops its shape in such a way that the movement of electric current changes in this photoreceptor neuron" [9].

What will happen in the absence of one type of pigments, in particular, corresponding to the red color? The answer is well known: color blindness, or rather protanopia — a violation in the red part of the spectrum. And such a person will not have the feeling of a "red" color, i.e. red color will not be perceived by them. What will a man with protanopia see in this case? The answer is gray, i.e. another color. Thus, the reduction (catastrophic in this case) occurred immediately due to illness. It is clear that it differs qualitatively from the reduction in the normal case (see earlier).

Normal human sight<sup>4</sup> is possible only with all three types of photopigments, conventionally called "red", "green" and "blue". It is known that various combinations of colors of the red, green and blue ranges of the spectrum and allow us to see other colors and tones (again, remember the color TV).

So, a necessary, but insufficient, condition for a normal human perception of red, first of all, is the presence of red pigments. Other necessary conditions for the perception of red is also the normal development of a number of other components of the visual system. Consider this case for a situation of conscious information processing (see earlier).

In a normal visual system, the signals are received as described above for processing in the area of the sensory map responsible for color, in particular red. Next, a sensory coalition of neurons responsible for the red color and perception of the corresponding object is assembled. *Ultimately, as a result of the passage of signals through the collected coalition of awareness, an energetic reconstruction takes place, which corresponds to the sensation of the person of the red object seen. I note that the passage of signals, the assembly of the coalition of awareness and energetic reconstruction occur simultaneously! Thus, the sensation of "red" arises in accordance with the formulated main principle of the functioning of the brain — signal transformations and energetic reconstructions.*

What influences the formation of sensory maps? Obviously, two factors play a crucial role: experience and genetics. Genetics leads to the fact that all normal people have approximately the same feeling of "red", if there are no serious violations in the acquired experience. "Approximately" is associated with these same two factors, namely, genetics and experience, or rather, with the individual characteristics of the corresponding neural circuits, which are the determining material basis of subjectivity [28]. So, it is known that there are people who better distinguish differences in colors, smells, have a more delicate ear for music, etc. Will these energetic reconstructions in the human brain fully correspond to reality? The answer is simple: no! Since any copy, and the energetic reconstruction is a copy, never coincides with the original. How does it happen for other animals? Obviously, these sensations may differ even more due to possible differences (see earlier) in signal transformations and energetic reconstructions in their brain.

Thus, our sensations do not fully reflect reality, but only approximately. According to the author, despite the fact that according to the formulated principle of

<sup>4</sup> What a pity that we have only three types of photopigments, so some birds and butterflies see invisible (not perceived) colors for us, having other types of pigments [27].



brain functioning, signal transformations and energetic reconstructions, it becomes generally clear what human sensations are, their exact description, like consciousness, is also impossible for similar reasons [7].

### **The nature of information processing in the brain and the nature of life**

Consider a few important questions.

Question 1. *Is information processing in the brain digital or analog?*

Immediately turn to the classics. So, J. von Neumann also wrote [29]: "The most direct conclusion from monitoring the work of the nervous system is that its activity is *prima facie* (at first glance) digital in nature." These words of the great scientist led a number of experts to conclude that the processing of information in the human brain is digital. It is only possible in these cases to regret that, firstly, the sentence itself was not attentively read (omitted "*prima facie* (at first glance)"), and, secondly, the author would recommend to read this legendary book carefully to the end. In particular, it is enough to cite another quotation from the section of the book "Digital and analog parts of the nervous system", namely [29]: "I want to say the following: the processes occurring in the nervous system can repeatedly, as I have already noted, change their character from digital to analog and back to digital, etc. " Surprise and admiration is caused by the fact that J. von Neumann published his analysis in 1958!

The information currently available allows us to support the point of view of J. von Neumann and to make an unequivocal conclusion on the issues under consideration.

We will consider one of the most complex modes of the brain — conscious processing of sensory information (see earlier). It turns out that the fundamentally important digital and analog components of information processing in this case take place not only at the microscopic, but also at the macroscopic level.

Microscopic level. You can find a lot of digital and analog components in the analysis of the functioning of the neural circuits of the brain at this level. I will highlight only two points. Part I [7] noted that the key active elements in electrical (neural) circuits of the first type are ion channels, i.e. NEMS operating on the principle: open — closed, i.e. digital. At the same time, diffusion processes are crucial in chemical synapses, i.e. explicit analog component is implemented. In this case, as noted earlier, there are regular conversions of signals from electrical to chemical, and vice versa.

Macroscopic level. In general, the operation of system 1 and system 2 looks continuous (in a spiral [7]). However, the transition from one coalition of neurons to another (see earlier) is clearly discrete in nature. The

same, at least, is the change of directions of thinking activity, the output of subconscious processes to the level of awareness that is transitions from one turn of the spiral to another (see [7]).

Consequently, thinking is a continuous-discrete process, and information processing in the brain is generally hierarchical in nature, combining both analog and digital components.

Question 2. *Is nature of life digital or analog?*

This question is more general than the related, more specific question 1. We will try to answer this question, since it is now of increasing interest (see, for example, [30]).

"The central dogma of molecular biology says that information in a cell goes from DNA through RNA to a protein, and no other way" [9]. The following statement by R. Dawkins is also known: "If we summarize molecular genetics in one word, I would say "digital" [31]. Such views lead experts to the currently popular conclusion that the nature of life is digital.

Again let us turn to the classic — the legendary book of J. von Neumann, namely [29]: "The genes themselves are obviously parts of the digital system of components. However, their actions are to stimulate the formation of specific chemicals, namely, certain enzymes inherent in this gene and therefore belongs to the analog domain. " Today it is possible to strengthen this point of view of the great scientist with the involvement of the established scientific field, in particular epigenetics. "Epigenetics: the study of gene expression under the influence of the environment. The discovery of alternative ways described in the central dogma of information transfer is sometimes called the third biological revolution" [9].

Consequently, in this question the analog component, connected with the influence of the environment, is of fundamental importance.

As a final argument, I will note the following. According to the most powerful modern physical theory — quantum mechanics — it is well known that three types of spectra of a physical quantity are possible, namely: 1) discrete; 2) consisting of separate lanes; 3) continuous. Thus quantum mechanics is fundamentally different from classical physics, in which only the continuous form of the spectrum is allowed. Therefore, the author believes that Nature, realizing life, including man, used all the wealth of possibilities.

For the reasons stated, the final and unequivocal answer to the two questions posed: "*The nature of both information processing in the human brain and the nature of life is common, that is analog-digital!*"

The questions discussed are of fundamental importance, at least for two very interesting problems: immortality and the creation of supermind.

Part I [7] noted that the copying of human consciousness can be considered as a peculiar variant of its immortality. From the previous it becomes clear that it is advisable to make copies of consciousness on an analog-digital (mixed or hybrid) basis. As for the creation of the supermind (see [23]), then, apparently, the analog-digital should also be the main one, i.e. hybrid electronics. It is possible that, like the human brain, it will be organic hybrid nanoelectronics [1–6].

### Problems and directions of consciousness research

The main problems of the study of the human brain as a whole, consciousness in particular, are primarily the result of its fantastic level of integration as an object of electronics. Part I [7] gave a very rough estimate — about  $10^{19} \dots 10^{21}$  active elements, namely: the number of channels  $M$ , i.e. NEMS. Unfortunately, at the present moment of time, we can confidently indicate only the range in which this number can be:

$$10^{15} \ll M \ll 10^{25}, \quad (1)$$

where the lower limit corresponds approximately to the number of synapses (it is known that the number of channels is much greater than the number of synapses), and the upper limit corresponds to the total number of molecules in the human brain (the brain volume is about  $10^3 \text{ cm}^3$ , and the number of molecules per  $\text{cm}^3$  is about  $10^{22}$ ). I note that the approximate average number of neurons  $N$  in the brain of a normal adult has been only recently determined, i.e. solved a simpler problem. It varies according to different sources in the range  $(86.1 \pm 8.1) \cdot 10^9$  [32]. There are approximately the same  $(85.0 \dots 86.0) \cdot 10^9$  glial cells [10, 33]. Thus, we are talking about the number  $N \approx 10^{11}$ . However, I note that at the same time, even the number of types of neurons is unknown, which, according to estimates, "undoubtedly, are more than a hundred, and maybe more than a thousand" [34]. Moreover, "there are no two completely identical neurons" [34]. With synapses, the situation is more complicated (usually the range is  $10^{14} \dots 10^{15}$ ). The author no longer discusses the issue of the numbers of dendrites, spines, as well as the morphological (topological) features of neural circuits. In connection with the above, it is extremely difficult to analyze the object of electronics, in which even the numbers of the main structures are unknown, and at the same time they are truly astronomical. There is no doubt that the modes of the brain, in which awareness is realized, are the most complex (see [7] and earlier). Do not forget about the possibility of many different options, even in the same modes of functioning of the brain. There is no doubt that the situation is complicated by the fact that we are dealing with reconstruc-

tions in the brain, and not with reality. How to investigate an object of such fantastic complexity with such significant uncertainties? *Thus, we are dealing with the task of a grand degree of complexity in the study of human consciousness. As already noted, its exact solution is impossible to obtain.*

Nevertheless, let us try to answer the question: what should be done to achieve a more adequate understanding of consciousness?

The analysis allows us to identify the following main directions.

First, it has already been noted that the most promising for further development are empirical theories of consciousness. Therefore, deeper studies in neurobiology (neurophysiology, neuropsychology, etc.) and neuroscience in general are of paramount importance. Unfortunately, research at the present time is often characterized by fragmentary, incomplete, inconsistent, and also based on private, usually statistically unreliable, data for specific people in a short period of time. At the same time, it is well known that the human brain is a dynamic, constantly changing structure. There are still a number of serious unclear issues in the work of the brain. In particular, the role of glial cells in information processing. For the author, it is clear that they affect the functioning of the brain, as important for the operation of synapses. How important is this influence? The question of neurogenesis (plasticity of the brain of the highest level [35]) is not entirely clear. It seems to me that these and many other questions (see, for example, [9]) may present considerable surprises in understanding the functioning of the brain.

Secondly, almost all modern methods and tools for experimental studies of the brain (visualization), unfortunately, are indirect and rather rude, as noted by many experts. So, a detailed analysis of modern methods of visualization of the brain is given in [9]. The verdict is not comforting: "... no method has the necessary space-time resolution for tracking single neurons and even small groups of nerve cells, for example, columns in the cortex" [9]. Therefore, it is necessary to use a whole set of methods, which is not always possible and complicates the analysis. The method of introspection used for the study of consciousness is, in general, an indirect method and also has a number of serious drawbacks. The most significant of which is that the process under study and the report about it are not only separated in time, but also that other areas can already be involved in the report compared to those participating in the process under study, and subconscious processes can also have an effect. All this together can lead to distortions, and ultimately to artifacts, which was noted, in particular, in [13]. Basically, the process of visual awareness is also investi-

gated. It is obvious that significant differences may arise in other types of awareness. All this requires a very careful interpretation of the results, the development of special methods for processing information. *The author sees the perspective for the qualitative improvement of experimental methods for the study of the brain in the use of nanoelectronics, nanomaterials, nanotechnologies and nanoscience in general [28].* This is all the more important because when creating the brain, Nature intensively used nanoobjects [28]: genes, DNA, RNA, neurotransmitters, proteins, etc., and the brain itself is an object of organic hybrid nanoelectronics.

Thirdly, considering the indirect, approximate nature of all methods of experimental studies of the brain, serious efforts are needed to develop theories of consciousness, the corresponding methods of mathematical modeling. According to the analysis of the current state of development of understanding of consciousness, apparently, priority must be given to empirical theories. They, apparently, correctly describe at least some aspects of consciousness. Let us not forget, however, about the great variety of conscious activity, the exceptional degree of complexity of the task (see earlier). For mathematical modeling, the development of multilevel simulation approaches and systems implementing them represents a perspective, one of the variants of which is described in [1, 2] within the framework of a full electronic interpretation of brain functioning. Important in this case is the property of openness of the approach, the ability to take into account the influence of various factors, combining with other approaches [28]. Since the main active elements in the brain, as an object of electronics, are the channels, i.e. NEMS, then the use of complex quantum-mechanical methods, at least at the lower hierarchical levels will be mandatory [1, 2]. In any case, it is necessary to take into account that the problem in question is related to the NP class problems in the mathematical sense [1, 2]. Considering the tremendous numbers of neurons  $N$  and NEMS  $M$  in the human brain, the development of statistical analysis methods [1, 2] and a synergistic approach [36] will also be promising. *Due to the current situation, the development of integrated approaches to the study of the brain [1, 2] based on the use of both different experimental methods and various methods of mathematical modeling should be considered an important area. At the same time, various theories of brain functioning can be used.*

And last, despite the importance of the study of human consciousness for the most diverse areas of science, technology and other activities, we should not forget that the priority direction is the possibility of restoring consciousness to people who lose or have already lost it. Unfortunately, the progress here is ex-

tremely insignificant. Certain hopes are currently being offered by complex empirical techniques, such as the ReCODE protocol for the treatment of Alzheimer's disease [37] and some other techniques for the recovery of a number of brain functions [38, 39]. Important in this direction should be a mandatory account of the patient's characteristics, i.e. individual character of neural circuits and other differences of his brain from the norm. Here, the author also sees a particular perspective in using the possibilities of nanoelectronics, nanomaterials, nanotechnologies, and nanoscience in general [28]. Our main ally in this most difficult direction of research will be the amazing plasticity of the brain, i.e. the brain itself [28].

## Conclusion

A more detailed analysis of the process of conscious processing of sensory information made it possible to formulate the main principle of brain functioning — signal transformations and energetic reconstructions. On this basis, one of the most difficult questions, usually associated with consciousness, is analyzed — qualia, i.e. human sensations. It is shown that sensory sensations are energetic reconstructions in the human brain when perceiving the corresponding objects. Like any other copies, they cannot fully correspond to reality.

The widely debated in the literature questions about the nature of information processing in the brain and the nature of life are considered. Of the three possible options for each of the questions, there are arguments that this character in both cases is common, namely analog-digital. It is noted that these questions are of fundamental importance for two problems: artificial immortality and the creation of supermind.

The main problems and prospects for the study of human consciousness are highlighted. It was emphasized that they are mainly determined by the fantastic level of integration of the brain as an object of organic hybrid nanoelectronics.

The main mistake in creating many theories of consciousness, apparently, was to find some standard scheme for its implementation. According to the author, in reality, it simply does not exist, but the main principle of the functioning of the brain is, namely: the signal transformations and energetic reconstructions. In general, the work of the brain is characterized by a huge variety. The main disadvantage and at the same time dignity of the brain, perhaps, is that it approximately reflects reality. Therefore, it is impossible to look at the brain as a standard object, relying on some fragmentary private data. Individuality is fundamentally important here, despite the general principles of building the brain, at least for normal people. How-

ever, it is obvious that this could not be otherwise, considering the fantastic level of integration of the brain as an object of electronics, as well as the features of the brain of each person. For the reasons stated, neither consciousness nor qualia can, unfortunately, be described and analyzed accurately, or maybe... fortunately!

*The author considers it a pleasant duty to express sincere gratitude to my students N. V. Kolomeitseva, I. A. Romanova and I. Y. Shcherbakova for preparing the manuscript for publication.*

## References

1. **Abramov I. I.** Mozg kak obekt jelektroniki. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 80 p. (in Russian).
2. **Abramov I. I.** Brain as an object of electronics. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 76 p.
3. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organicheskoy gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' I, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 1, pp. 52—54. (in Russian).
4. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organicheskoy gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' II, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 3, pp. 45—53. (in Russian).
5. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organicheskoy gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' III, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 5, pp. 45—54. (in Russian).
6. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organicheskoy gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' IV, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 6, pp. 49—53. (in Russian).
7. **Abramov I. I.** Human consciousness, or possibilities of electronics. Part I. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2018, vol. 20, no. 5. P. 308—320. (in Russian).
8. **Nicholls J. G., Martin A. R., Wallace B. G., Fuchs P. A.** From neuron to brain. 4-th ed. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, Inc. Publishers, 2001.
9. **Cognition**, brain, and consciousness. Introduction to cognitive neuroscience. Second Edition / Ed. by B. J. Baars, N. M. Gage. Amsterdam: Elsevier, 2010. 658 p.
10. **Gazzaniga M. S.** Who's in charge? Free will and the science of the brain. New York: Harper Collins Publishers, 2011.
11. **Goldberg E.** The executive brain: Frontal lobes in a complex world. Oxford University Press, 2001.
12. **Duncan J.** How intelligence happens. London: Yale University Press, 2010.
13. **Dehaene S.** Consciousness and the brain. Deciphering how the brain codes our thoughts. New York: Viking, 2014.
14. **Kaku M.** The future of the mind: The scientific quest to understand, enhance, and empower the mind. New York: Doubleday Publishers, 2014. 400 p.
15. **Revonsuo A.** Consciousness. The science of subjectivity. Hove and New York: Psychology Press, Taylor & Francis Group. 2010. 324 p.
16. **Abramov I. I.** Mozg cheloveka — shedevr estestvennoj jelektroniki. Problemy i perspektivy issledovaniya. Materialy Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. "Aktual'nye problemy radio- i kinotehnologij", 2017, Russia, Sankt-Peterburg, pp. 79—86. (in Russian).
17. **Luria A. R.** Lektsii po obshchey psikhologii. SPb.: Piter. 2007. 320 p. (in Russian).
18. **Batuyev A. S.** Fiziologiya vysshej nervnoj dejatel'nosti i sensoryh sistem: Uchebnik dlja vuzov. Sankt-Peterburg, Piter. 2010. 317 p. (in Russian).
19. **Damasio A.** Self comes to mind. Constructing the conscious brain. New York: Pantheon Books, 2010.
20. **How the brain works.** ed. by P. Abrahams. Bright Star Publishing Co., 2015.
21. **Ramachandran V. S.** The tell-tale brain. A neuroscientist's quest for what makes us human. New York: W. W. Norton & Company, 2011.
22. **Kandel E. R.** In search of memory: The emergence of a new science of mind. W. W. Norton & Company, 2006.
23. **Abramov I. I.** Human consciousness, or possibilities of electronics. Part II. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 368—384 (in Russian).
24. **Compernelle T.** Brain chains. Discover your brain and unleash its full potential in hyperconnected multitasking world. Compublications, 2014.
25. **Luria A. R.** Osnovy nejropsihologii. M.: Izd-vo MGU, 1973. 375 p. (in Russian).
26. **Chalmers D. J.** The conscious mind: In search of a fundamental theory. Oxford University Press, 1996.
27. **Carroll S. B.** The making of the fittest. DNA and the ultimate forensic record of evolution. N. Y., London: W. Norton & Company, 2006.
28. **Abramov I. I.** Prospects of nanoelectronics, nanomaterials and nanotechnologies in research and medicine of the human brain, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 49—64.
29. **Von Neumann J.** The computer and the brain. New Haven, Connecticut: Yale University Press, 1958.
30. **Life:** The leading edge of evolutionary biology, genetics, anthropology, and environment science / Ed. by J. Brockman. Harper Perennial, 2016.
31. **The next fifty years:** Science in the first half of the twenty-first century / Ed. by J. Brockman. Vintage, 2002.
32. **Bostrom N.** Superintelligence. Path, dangers, strategies. N. Y.: Oxford University Press, 2014.
33. **Hood B. M.** The self illusion: Why there is no 'you' inside your head. Constabl, 2012.
34. **Hubel D. H.** Eye, brain and vision. New York: Scientific American Library, 1988.
35. **Kempermann G.** Die revolution im kopf: Wie neue nervenzellen unser gehirn ein leben lang jung halten. Droemer eBook, 2016.
36. **Haken H.** Principles of brain functioning. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
37. **Bredesen D. E.** The end of Alzheimer's. The first program to prevent and reverse cognitive decline. Avery, 2017.
38. **Amen D. G.** Change your brain, change your life. N. Y.: Penguin, 1998.
39. **Perlmutter D., Colman C.** The better brain book. N. Y.: Penguin, 2005.

# ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "АНТЕННЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН 2019" (APP'2019)



**15—17 октября 2019 г. в СПбГЭТУ "ЛЭТИ" состоится Всероссийская научно-техническая конференция "Антенны и распространение радиоволн 2019" (APP'2019).**

Всероссийская конференция APP'2019 проводится в рамках Санкт-Петербургской Антенной Недели 2019 совместно с Antenna Design and Measurement International Conference 2019 (ADMInC'2019) и предоставляет специалистам в области антенной техники, электродинамики, измерений антенных систем и распространения радиоволн широкие возможности для представления новых научных результатов, обмена опытом и установления деловых контактов.

Материалы конференции будут включены в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Рабочий язык конференции — русский.

### **Тематика конференции:**

- Широкополосные антенны
- Антенные решетки
- Смарт-антенны и технологии MIMO
- Излучатели и элементы антенных трактов
- Измерения в антенной технике
- Исследование характеристик рассеяния
- Новые материалы в антенной технике и технике СВЧ
- Распространение радиоволн
- Антенны телекоммуникационных систем 5G

### Организационные взносы:

- Взнос за участие в конференции в качестве слушателя — 1000 рублей
- Взнос за участие в конференции с представлением и публикацией доклада — 4000 рублей
- Взнос за участие в конференции для аспирантов и студентов — 500 рублей
- Взнос за участие в конференции с представлением и публикацией доклада для аспирантов и студентов — 1000 рублей

Полная информация о конференции доступна на сайте (<http://antennaconf.com>).

Конференция проводится при поддержке Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга, Российского представительства компании Keysight Technologies, АО НПФ "Диполь", Института прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН), Санкт-Петербургской организации Общероссийской общественной организации "Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова" (СПБНТОРЭС).

Конференция АРР'2019 проводится в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), который располагается в исторической части Санкт-Петербурга вблизи отелей, ресторанов, музеев и достопримечательностей.

### Контакты:

Санкт-Петербургский  
государственный  
электротехнический  
университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова  
(Ленина)

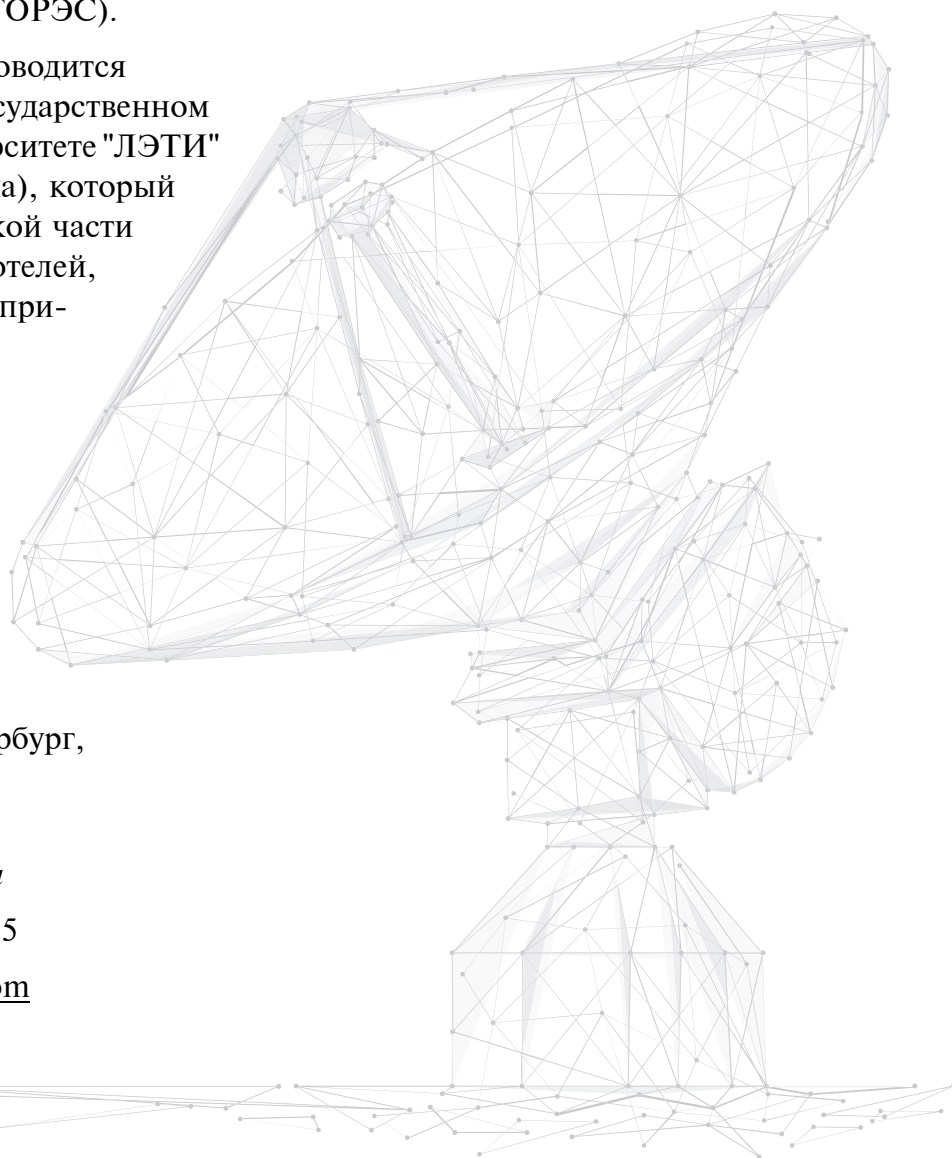
Адрес: 197376, Санкт-Петербург,  
ул. Профессора Попова, 5

Контактное лицо:

*Любина Любовь Михайловна*

Телефон: +7 (981) 125-91-85

E-mail: [info@antennaconf.com](mailto:info@antennaconf.com)



---

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

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

Сдано в набор 19.07.2019. Подписано в печать 22.08.2019. Формат 60×88 1/8. Заказ МС919. 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](http://www.aov.ru)



Рисунки к статье А. В. Дерябкина, М. П. Духновского, Е. Н. Куликова, Ю. Ю. Федорова, С. В. Щербакова  
«МОНОЛИТНАЯ ЗАМЕДЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА  
ДЛЯ ЛВВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН»

A. V. Deryabkin., M. P. Dukhnovsky, E. N. Kulikov, Yu. Yu. Fedorov, S. V. Scherbakov  
«MONOLITHIC SLOW-WAVE STRUCTURE FROM A POLYCRYSTALLINE DIAMOND FOR TWT  
OF THE MILLIMETER BAND OF THE WAVELENGTH»

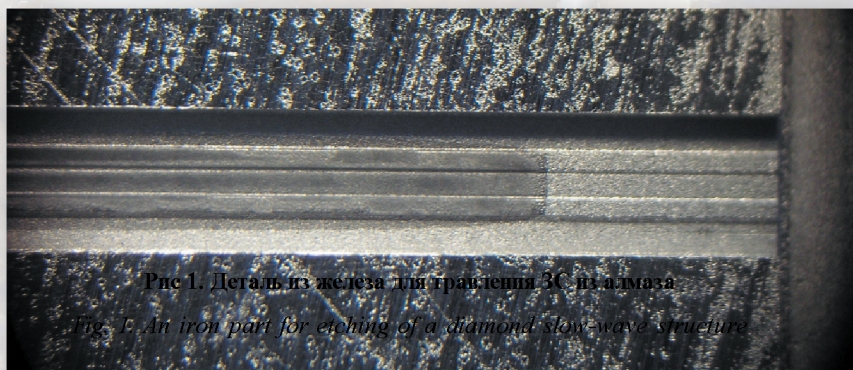


Рис 1. Деталь из железа для травления ЗС из алмаза  
*Fig. 1. An iron part for etching of a diamond slow-wave structure*

Рис. 1. Деталь из железа для травления ЗС из алмаза

*Fig. 1. An iron part for etching of a diamond slow-wave structure*

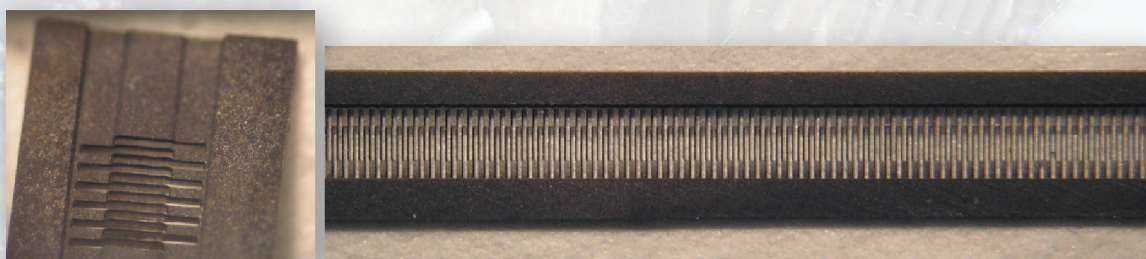


Рис. 3. Фрагменты ЗС после прецизионной лазерной резки  
*Fig. 3. Fragments of a slow-wave structure after precision laser cutting*



Рис. 4. Фрагмент планарной монолитной ЗС из поликристаллического алмаза  
*Fig. 4. A fragment of a planar monolithic slow-wave structure from a polycrystalline diamond*



Рисунки к статье В. Е. Пауткина  
 «ФРАКТАЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛИЗАЦИИ  
 ПРИ СБОРКЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ»

V. E. Pautkin

«FRACTAL DESTRUCTION OF THE METALLIZATION DURING ASSEMBLY  
 OF THE MICROMECHANICAL SENSITIVE ELEMENTS»

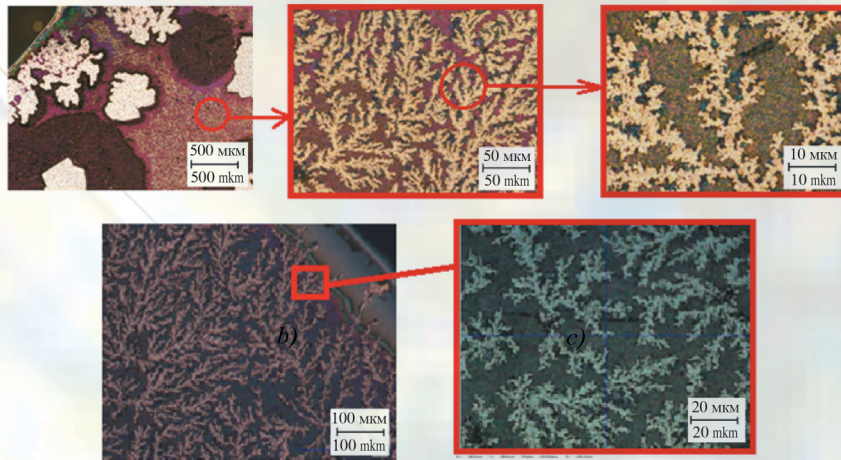


Рис. 2. Изображения разрушенной пленки алюминия при различном увеличении (оптический цифровой микроскоп HiroxKH-7700)

Fig. 2. Images of the destroyed aluminum film at various magnifications (HiroxKH-7700 optical digital microscope)

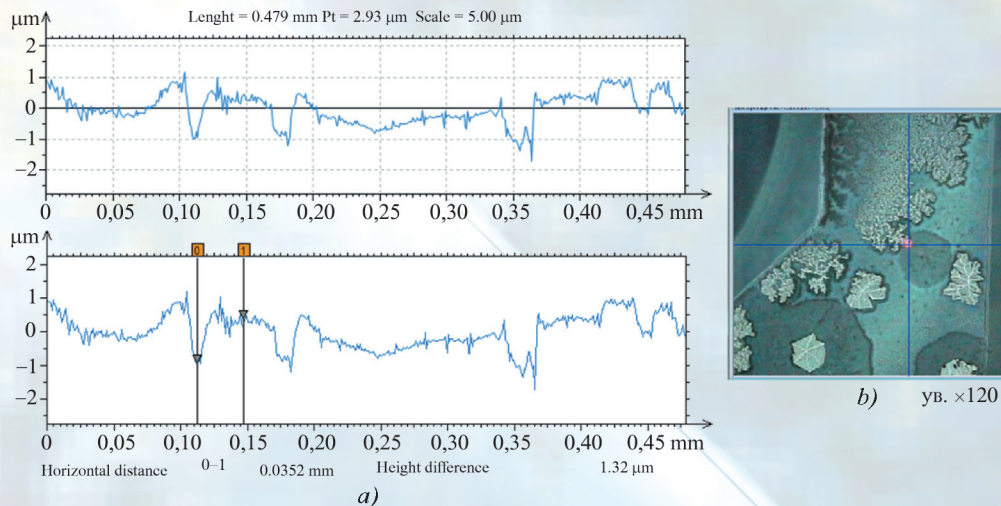


Рис. 4. Профилограмма (а) и фотография алюминиевой пленки (b), полученные на участке длиной 450 мкм

Fig. 4. A profilogram (a) and a photo of the aluminum film (b) received on the site with the length of 450 μm

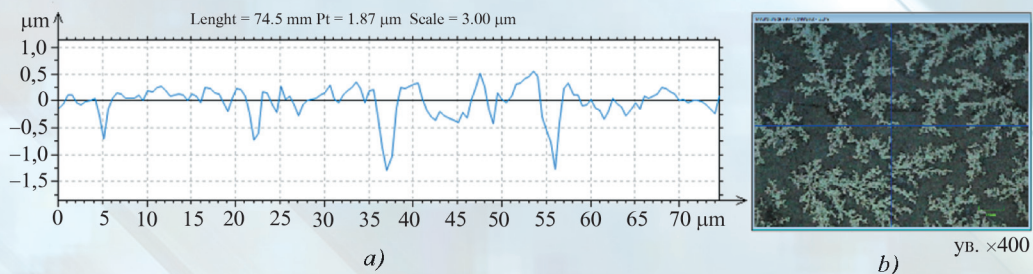


Рис. 5. Профилограмма (а) и фотография алюминиевой пленки (b), полученные на участке длиной 70 мкм

Fig. 5. A profilogram (a) and a photo of the aluminum film (b) received on the site with the length of 70 μm