

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 12(173) ✧ 2014

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России,
в систему Российского индекса научного цитирования и с 2009 г. реферируется в базе данных INSPEC

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:

Аристов В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН
Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН
Гапонов С. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН
Каляев И. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН
Квардаков В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН
Климов Д. М., д.т.н., проф., акад. РАН
Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН
Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН
Никитов С. А., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН
Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН (Япония)
Сауров А. Н., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН
Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН
Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., чл.-кор. 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)
Андреевский Р. А., д.х.н., проф.
Антонов Б. И.
Астахов М. В., д.х.н., проф.
Быков В. А., д.т.н., проф.
Горнев Е. С., д.т.н., проф.
Градецкий В. Г., д.т.н., проф.
Кальнов В. А., к.т.н.
Карякин А. А., д.х.н., проф.
Колобов Ю. Р., д.т.н., проф.
Кузин А. Ю., д.т.н., проф.
Панич А. Е., д.т.н., проф.
Петросянц К. О., д.т.н., проф.
Петрунин В. Ф., д.ф.-м.н., проф.
Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)
Путилов А. В., д.т.н., проф.
Телец В. А., д.т.н., проф.
Тимошенков С. П., д.т.н., проф.
Тодуа П. А., д.т.н., проф.
Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Зенченко Н. В., Рубан О. А., Алёшин А. Н., Глинский И. А., Мельников А. А. Моделирование нестационарных тепловых режимов НЕМТ-транзистора 3

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Турков В. Е., Жукова С. А., Рискин Д. Д., Бабаевский П. Г., Резниченко Г. М. Реактивные микродвигатели, изготавливаемые по технологии МСТ. 7

Макеев М. О., Иванов Ю. А., Мешков С. А., Синякин В. Ю. Исследования термической деградации резонансно-туннельных диодов на базе AlAs/GaAs-наногетероструктур 23

СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ

Вишнеков А. В., Ерохин В. В., Иванова Е. М. Верификация СНК: выбор стратегии 30

БИОЭЛЕКТРОНИКА

Игнатов И. И., Мосин О. В. Эффект Кирлиан в изучении газоразрядного свечения биологических объектов и воды 37

КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ, ВЫСТАВКИ

Раткин Л. С. Современные импортозамещающие технологии: от квантовой наноэлектроники — к компьютерной стеганографии 47

Указатель статей, опубликованных в журнале "Нано- и микросистемная техника" в 2014 году 51

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайте журнала (<http://microsystems.ru>; <http://novtex.ru/nmst/>) и научной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 по 2012 г. в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА:

по каталогу Роспечати (индекс 79493);
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

Journal of NANO- and MICROSYSTEM TECHNIQUE

NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEHNIKA

ISSN 1813-8586

№ 12

(173)

2014

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof. — **EDITOR IN CHIEF**
Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY OF EDITOR IN CHIEF

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA) —
DEPUTY OF EDITOR IN CHIEF

Editorial council:

Aristov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Gaponov S. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Kaljaev I. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Klimov D. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Kvardakov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Nikitov S. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Ryzhii V. I. (Japan), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,
Cor.-Mem. RAS
Surov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. 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.
Andrievskii R. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Antonov B. I.
Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Bykov V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Gradetskiy V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)
Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Kolobov Ju. R., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kuzin A. U., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Petrosjants C. O., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Petrinin V. F., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.)
Putilov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Todua P. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Executive secretary:

Lysenko A. V.

Editorial staff:

Chugunova A. V.
Grigorin-Ryabova E. V.

Address:

4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia.
Tel/Fax: +7(499)269-55-10. Web: www.microsystems.ru/eng;
e-mail: nmst@novtex.ru

The Journal is included in the list
of the Higher Attestation Commission
of the Russian Federation,
in the Russian system of science citation index
and INSPEC data base

Published since November 1999

CONTENTS

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

**Zenchenko N. V., Ruban O. A., Aleshin A. N., Glinskiy I. A.,
Melnikov A. A.** Simulation of Nonstationary HEMT-Transistor
Thermal Modes 3

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

**Turkov V. E., Zhukova S. A., Riskin D. D., Babayevsky P. G.,
Reznichenko G. M.** MEMS-Based Micro Propulsion Systems . . . 7

Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Meshkov S. A., Sinyakin V. Yu.
Investigation of Thermal Degradation of Resonant Tunneling
Diodes Based on Nanoscale AlAs/GaAs Heterostructures . . . 23

SISTEMS ON CHIP

Vishnekov A. V., Erokhin V. V., Ivanova E. M. SoC Verifica-
tion: Choice of Strategy 30

BIOELECTRONICS

Ignatov I. I., Mosin O. V. Kirlian Effect in Studying of Gas
Discharge Glow of Biological Objects and Water by the Method
of Color Kirlian Analysis 37

CONFERENCES, SEMINARS, EXHIBITIONS

Rathkeen L. S. Modern Import Substitution Technologies:
Form Quantum Nanoelectronics towards Computer Stegano-
graphy 47

Index of articles published in the journal "NANO and MICRO-
SYSTEM TECHNIQUE" in 2014 51

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.382.323

Н. В. Зенченко, инженер-исследователь, e-mail: morfeus812@mail.ru,

О. А. Рубан, инженер-исследователь, e-mail: mux.05@mail.ru, **А. Н. Алёшин**, д-р физ.-мат. наук, зав. лаб,

e-mail: a.n.aleshin@mail.ru, **И. А. Глинский**, инженер-исследователь, e-mail: glinskiy.igor@yandex.ru,

ИСВЧПЭ РАН, **А. А. Мельников**, д-р техн. наук, проф., e-mail: melnikov@mirea.ru, МГТУ МИРЭА

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ НЕМТ-ТРАНЗИСТОРА

Поступила в редакцию 17.07.2014

Проведено моделирование нестационарных тепловых процессов в НЕМТ-транзисторе. На основе топологии была создана трехмерная модель НЕМТ-транзистора L -диапазона. Исследовалось изменение температуры канала в зависимости от скважности в импульсном режиме работы транзистора. Было установлено, что в течение 1 мкс после включения температура канала растет с существенно большей скоростью, чем в остальной интервал времени. Выявлено, что зависимость максимальной температуры в объекте от скважности нелинейная и при одинаковой скважности импульс меньшей длительности дает меньший нагрев. Был обнаружен эффект термического насыщения при уравнивании тепловыделения транзистора с отводимой теплотой.

Ключевые слова: НЕМТ-транзистор, моделирование тепловых процессов

Введение

Освоение и развитие современных методов приборно-технологического моделирования представляет собой важный этап на пути разработки и создания новых перспективных твердотельных СВЧ приборов и изделий электронной техники (ИЭТ) на их основе. Применение приборно-технологического моделирования при разработке позволяет выявить недостатки в конструкции изделия еще до изготовления первых опытных образцов. В частности, расчет тепловых режимов позволяет установить оптимальные тепловые режимы, в которых изделие сохранит свою работоспособность [1].

СВЧ параметры транзисторов с рабочей частотой от 1 ГГц и выше измеряются при импульсных режимах работы [2], в ходе чего на транзистор подаются импульсы тока, в результате которых возникает генерация теплоты. Процесс распределения теплоты в такой системе является нестационарным, так как временные параметры импульсов настолько малы, что тепловое равновесие не успевает установиться. Известно, что достаточно много транзисторов выходит из строя во время измере-

ний в результате большого темпа генерации теплоты. Поэтому необходимо проводить моделирование тепловых процессов, чтобы уменьшить число вышедших из строя изделий во время измерений.

Целью работы является проведение моделирования тепловых процессов в НЕМТ-транзисторе и анализ полученных результатов с целью установить оптимальные режимы работы.

В данной работе представлены результаты моделирования нестационарных тепловых режимов НЕМТ-транзистора. Моделирование работы НЕМТ-транзистора в импульсном режиме позволяет определить оптимальную скважность и длительность импульса, чтобы обеспечить максимально эффективную работу МИС. Были проведены расчеты при скважности 50 и 87,5 с длительностью импульса 1 и 3 мкс.

Нестационарное моделирование тепловых процессов

Трехмерная модель НЕМТ-транзистора L -диапазона была создана по топологии усилителя мощности L -диапазона, затем импортирована в про-

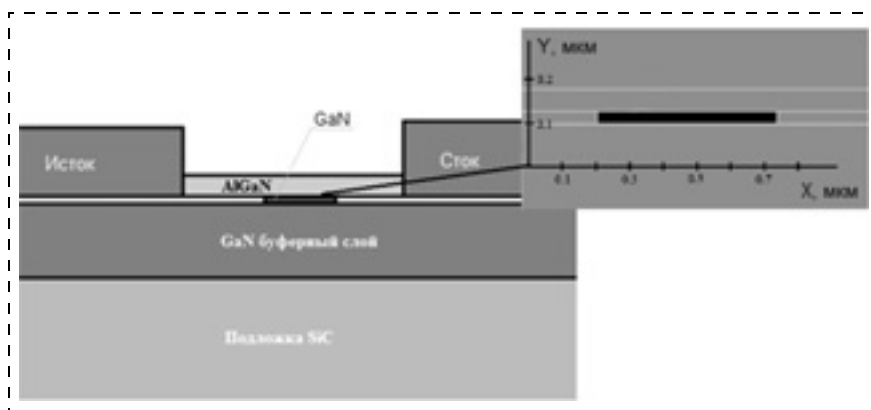


Рис. 1. Рассчитываемая область

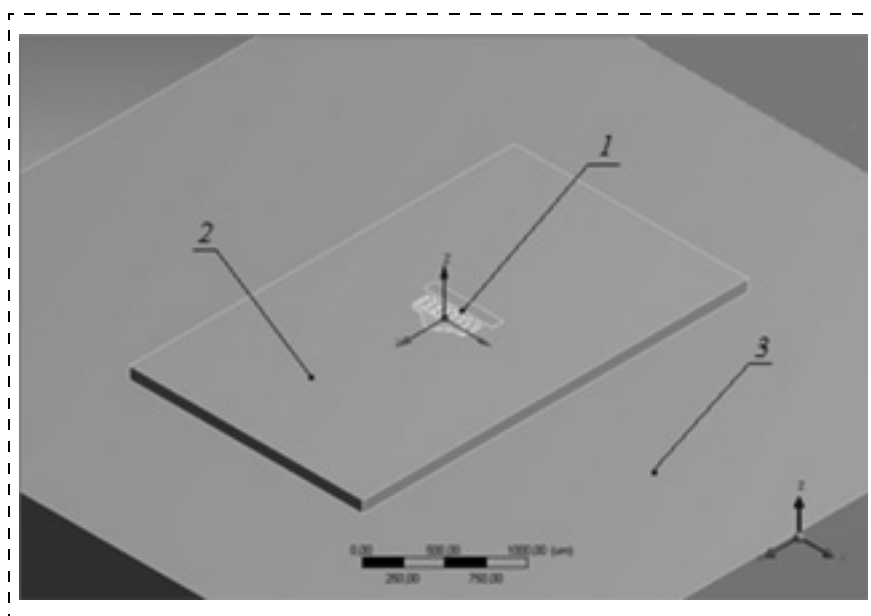


Рис. 2. 3D-модель, изометрия:

1 — транзистор; 2 — подложка; 3 — теплоотвод

граммную среду, предназначенную для моделирования тепловых процессов. Схема слоев транзистора представлена на рис. 1, а изометрия 3D-модели — на рис. 2. Размер подложки — $2000 \times 3000 \times 100$ мкм, размер теплоотвода — $6 \times 6 \times 3$ мм. В модели были заданы тепловые свойства материалов, приведенные в табл. 1 материалы изотропные.

Работу транзистора в терминах теплопередачи можно описать как процессы генерации теплоты внутренним тепловым источником, переноса теплоты в среде, а также распространения теплоты.

В расчетах использовали уравнение теплопроводности

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \quad (1)$$

где q_v — мощность внутреннего источника теплоты; λ — коэффициент теплопроводности; ρ —

плотность вещества; c_p — теплоемкость вещества при постоянном давлении; T — температура в процессе работы; τ — время.

Дифференциальное уравнение (1) решается методом конечных элементов при граничных условиях третьего рода

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_S = -\frac{\alpha}{\lambda} (T - T_c), \quad (2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; T_c — температура окружающего пространства; n — модуль вектора нормали; S — площадь, к которой применяется граничное условие.

Стоит отметить, что в данной работе проводится моделирование только тепловых процессов. В данной тепловой модели транзистора источником теплоты является подзатворная часть канала. Контакт между слоями считаем идеальным. Выделенная черным область (рис. 1) была задана как объект, генерирующий удельное тепловыделение 10^{18} Вт/м³. Генерация теплоты осуществлялась в импульсном режиме. Используется медный теплоотвод. Время работы транзистора — 100 мкс. Величина q_v тепловых импульсов выбрана в соответствии с

данными статей [2, 3], где рассматривалось моделирование электрофизических и полупроводниковых свойств подобных устройств.

Таблица 1

Свойства материалов

Материал	Функция в модели	Плотность, кг/м ³	Удельная теплопроводность, Вт/(м · К)	Удельная теплоемкость, (Дж · кг)/К
Al	Сток, исток	2689	237,5	951
Cu	Теплоотвод	8933	400	385
GaN	Гетероструктура	6150	130	490
AlGaIn		5184	40	604
SiC	Подложка	3200	490	490

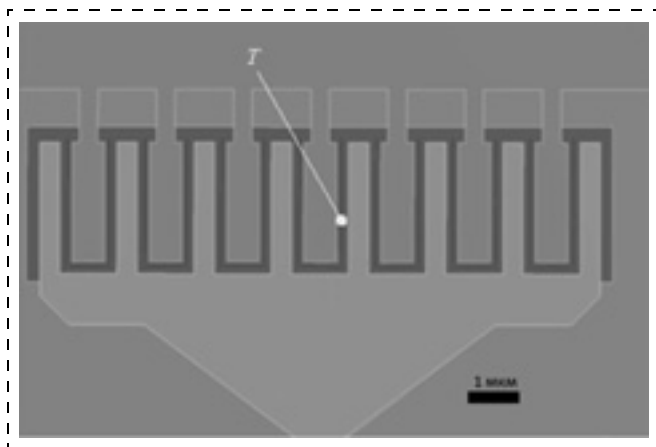


Рис. 3. Точка, в которой проводилось измерение температуры

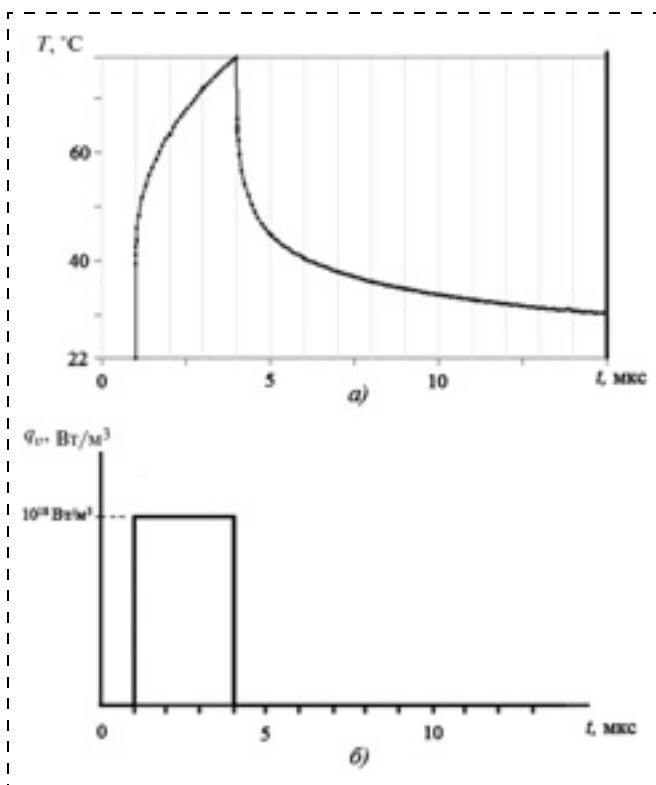


Рис. 4. Температура в точке "Т" при подаче одиночного импульса длительностью 3 мкс (а); форма импульса (б)

В расчетах были приняты следующие условия:

- коэффициент теплоотдачи 10 Вт/м²;
- температура окружающей среды 22 °С;
- начальная температура объекта 22 °С.

Была выбрана точка Т, в которой отслеживалось изменение температуры (рис. 3), так как в ней были зафиксированы максимальные значения температуры. Представляет интерес именно максимальное значение температуры, так как можно будет наблюдать, при каких условиях канал начнет деградировать из-за перегрева [4].

На рис. 4 представлен результат моделирования одиночного импульса длительностью 3 мкс, из

которого видно, что основной рост температуры подзатворной области проходит всего за 1 мкс. Далее рост температуры становится практически линейным.

На рис. 5 представлены результаты моделирования при скважности 50 и 87,5. Видно, что через 70 мкс рост температуры замедляется, так как теплота доходит до нижней грани подложки и начинает уходить в теплоотвод. За счет тепловой инерции рост температуры на начальных импульсах проходит быстрее, затем под влиянием теплоотвода и конвекции постепенно замедляется.

На рис. 5, б представлены результаты расчетов при скважности 87,5. Максимальный нагрев равен 74 °С. Как видно в табл. 2, при данной скважности была отмечена разница максимальных зарегистрированных температур в сравнении со скважностью 75, а именно 14 °С, в то время как разница температур при скважностях 50 и 75 составляла около 30 °С. Это объясняется влиянием тепловой инерции. Как и в случае нагрева канала, его охлаждение вначале происходит очень быстро до температуры окружающей его области. В свою очередь, распределение нагрева по подложке происходит мед-

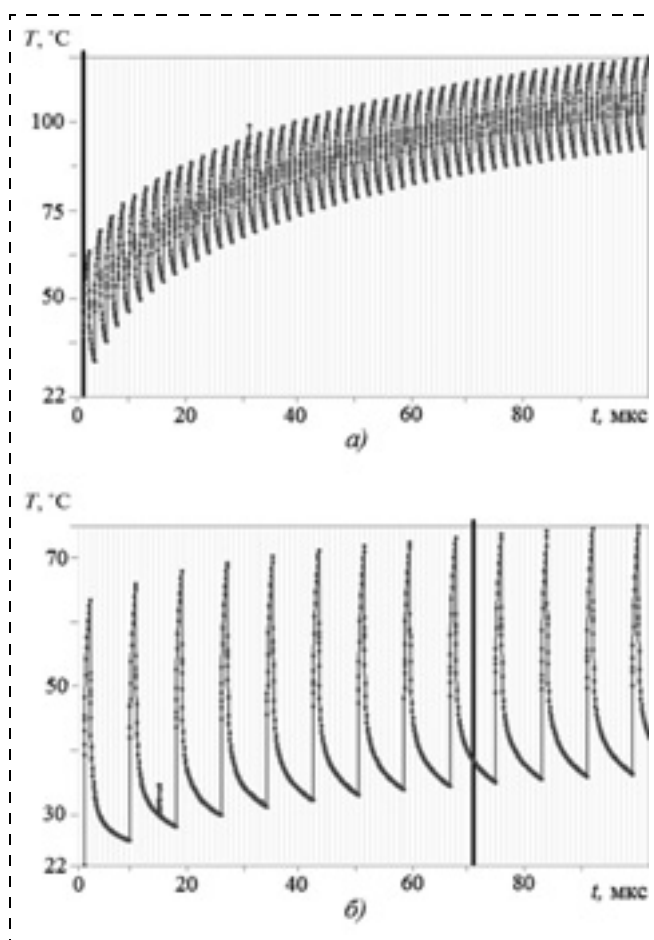


Рис. 5. Температура в точке Т, длительность импульса 1 мкс: а — скважность 50; б — скважность 87,5

Таблица 2

Температура в точке T при различных скважностях и длительностях импульса

Скважность	Длительность импульса, мкс	Температура, °C
50	1	118
	2	121
	3	123
75	1	88
	2	93
	3	96
87,5	1	74

ленно. Вследствие этого между скважностью и максимальной температурой канала наблюдается нелинейная зависимость.

Заключение

Полученные результаты дают основание полагать, что моделирование нестационарных тепловых режимов может быть применено при выборе оптимальных режимов работы будущего изделия.

Возможно, уменьшение толщины подложки или добавление теплоотводящего элемента конструкции (ТЭК) из материала, обладающего высокой теплопроводностью, например алмаза, позволит понизить нагрев активной области. Таким образом, подобное моделирование позволяет выбрать оптимальные геометрические и тепловые параметры изделия.

Выявлено, что температура подзатворной области нелинейно зависит от времени (зависимость

представлена на рис. 4) и скорость нагрева стабилизируется за 1 мкс.

Выявлено, что при одинаковых скважностях наиболее короткий импульс дает меньший нагрев. С помощью этих данных можно правильно подбирать параметры импульса для проведения импульсных измерений.

Обнаружено, что зависимость температуры от скважности нелинейная. Это связано с явлением тепловой инерции, и с точки зрения информативности сигнала наиболее оптимально использование скважности 75, так как увеличение скважности не влечет за собой существенного уменьшения температуры.

Работа выполнена в организации Головного исполнителя ОКТР — ИСВЧПЭ РАН в рамках реализации Постановления Правительства России от 09 апреля 2010 года № 218 (Договор № 33/211-13 от 22 февраля 2013 г. между ИСВЧПЭ РАН и ОАО "НПП "Исток" им. Шокина") и в рамках Соглашения № 14.607.21.0011 о предоставлении субсидии с Минобрнауки России от 5 июня 2014 года.

Список литературы

1. GaN power electronics market may top \$1 bn in a few years // Semiconductor Today: электронный журнал 8 марта 2012. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2012/MAR/YOLE_080312.html.
2. Кишинский А. А. Твердотельные СВЧ усилители мощности на нитриде галлия — состояние и перспективы развития // Матер. междунар. конф. "Microwave & Telecommunication Technology". Севастополь, 14–18 сентября 2009.
3. Freeman J. C., Mueller W. Channel Temperature Determination for AlGaIn/GaN HEMTs on SiC and Sapphire // NASA/TM—2008-215444. 2008. P. 1–112.
4. Simulating the Source of Polarization Charge in AlGaIn/GaN HFETs // The Simulation Standard. August 2008. V. 15, N. 8. P. 1–11.

N. V. Zenchenko, Research Engineer, O. A. Ruban, Research Engineer, A. N. Aleshin, Head of the Laboratory, I. A. Glinskiy, Research Engineer, A. A. Melnikov, Professor MGTU MIREA, Institute of ultra-high-frequencies semiconductor electronics Russian academy of science (IUHFSE RAS), e-mail: morfeus812@mail.ru

Simulation of Nonstationary HEMT-Transistor Thermal Modes

This article presents the simulation results of non-steady state thermal processes in the HEMT-transistor. L-band HEMT-transistor model was created and consisted of heterostructure and topology. The change in channel temperature depending on the pulsed mode duty cycle is considered. It was found that for 300 ns after switching on the channel temperature increases with the significant higher rate than the rest of the time interval. It was established that the maximum temperature reached and duty cycle have a nonlinear dependence. At the same duty cycle shortest pulse gives smallest temperature. The thermal saturation effect when transistor heat rate and heat dissipation to air are balanced was found.

Keywords: HEMT, thermal processes simulation

References

1. GaN power electronics market may top 1bn in a few years. *Semiconductor Today: electronoc journal* 8 march 2012. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2012/MAR/YOLE_080312.html.
2. Kishinskiy A. A. Tverdotelnie SVCh usiliteli moshnosti na nitride galliya — sostoyanie i perspektivi razvitiya. *Mater.*

mejdunar. konf. "Microwave & Telecommunication Technology". Sevastopol. 2009.

3. Freeman J. C., Mueller W. Channel Temperature Determination for AlGaIn/GaN HEMTs on SiC and Sapphire. *NASA/TM—2008-215444*. 2008. P. 1–112.
4. Simulating the Source of Polarization Charge in AlGaIn/GaN HFETs. *The Simulation Standard*. 2008. V. 15, N. 8. P. 1–11.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ Micro- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 531.76

В. Е. Турков*, канд. физ.-мат. наук, нач. центра, **С. А. Жукова***, канд. техн. наук, нач. комплекса, **Д. Д. Рискин***, вед. инж., **П. Г. Бабаевский****, д-р техн. наук, проф., зав. каф., **Г. М. Резниченко****, канд. техн. наук, доц.

* ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт имени Д. И. Менделеева", г. Москва

** "МАТИ" — Российский государственный технологический университет имени К. Э. Циолковского, г. Москва

E-mail: szh17@ya.ru

РЕАКТИВНЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫЕ ПО ТЕХНОЛОГИИ МСТ

Поступила в редакцию 08.07.2014

Дан обзор мировых разработок реактивных микродвигателей, изготавливаемых по технологии микросистемной техники (МСТ). Рассмотрены принципы работы твердотопливных и электрических коллоидных реактивных микродвигателей (РМДТТ и РМДЭК), их конструкционные, топологические и технологические особенности, а также возможности и проблемы расчетов и моделирования. Приведены примеры американских, европейских, китайских, российских и других разработок РМДТТ и РМДЭК.

Ключевые слова: твердотельные реактивные микродвигатели, электрические коллоидные реактивные микродвигатели, микросистемная техника, МЭМС

Введение

Развитие технологий объемных, поверхностных и комбинированных микрообработок в производстве микросистемной техники (МСТ), или микроэлектромеханических систем (МЭМС) открыло широкие возможности миниатюризации и массового производства большого числа различных микроустройств, в том числе реактивных микродвигателей (РМД) [1—12]. Работы по созданию РМД по технологии МСТ интенсивно проводят в различных странах в течение последних 10—15 лет. Такие двигатели имеют важнейшее значение для совершенствования, миниатюризации и удешевления аэрокосмических и ракетно-артиллерийских систем. По аналогии с ракетными макродвигателями микродвигатели подразделяют на два основных класса: работающие на химическом и электрическом принципах создания реактивной тяги, т. е. соответственно, на горении топлива и распылении заряженных частиц (ионов, жидких капель или твердых частиц). Цель данной работы — рассмотрение принципов работы основных типов твердотопливных и электрических коллоидных РМД (РМДТТ и РМДЭК), их конструкционных, тополо-

гических и технологических особенностей, возможностей математического моделирования, а также анализ разработок таких двигателей по технологии МСТ в различных странах мира.

1. Принципы работы, конструкторско-топологические и технологические особенности, возможности и проблемы расчетов и моделирования РМД, изготавливаемых по технологии МСТ

Основными характеристиками реактивных двигателей являются сила тяги (усилие, которое развивает двигатель в направлении движения), а также показатели их эффективности (удельная тяга, или удельный импульс): чем больше эти показатели, тем меньше рабочего тела (топлива или рабочей среды) надо потратить, чтобы получить определенную силу тяги и удельный импульс. В соответствии с теорией реактивного движения сила тяги двигателя F определяется равенством: $F = ma = v_{\text{эф}} \dot{m}$, где ma — импульс или количество движения двигателя (произведение массы на ускорение); $v_{\text{эф}}$ — эффективная скорость истечения реактивной струи (м/с), $\dot{m} = dm/dt$ — скорость расхода массы рабочего тела (кг/с). Тогда массовая удельная тяга оп-

ределяется как отношение тяги двигателя к массовому секунднему расходу топлива: $I_m = \frac{F}{\dot{m}} = v_{\text{эф}}$ и имеет размерность метр в секунду (м/с). Если брать отношение тяги к весовому расходу топлива, то *удельная весовая тяга* равна $I_g = \frac{F}{\dot{m}g} = \frac{v_{\text{эф}}}{g}$, что соответствует ее размерности в секундах. *Массовый удельный импульс* равен отношению создаваемого двигателем импульса (количества движения) к массовому расходу рабочего тела, а *весовой* — весовому расходу. Таким образом, в русскоязычной литературе термины *удельная тяга* и *удельный импульс* являются синонимами (англ. *specific impulse*), причем первый термин применяется обычно во внутренней баллистике (в двигателестроении), а второй — во внешней баллистике. В данном обзоре в качестве показателя эффективности РМД используется в основном удельный весовой импульс, означающий, сколько секунд данный двигатель сможет создавать тягу в 1 Н, истратив при этом 1 кг рабочего тела. Для перевода весового удельного импульса в массовый его значение надо умножить на ускорение свободного падения g . Твердотопливные двигатели при заданной массе отличаются высокой силой тяги, но малым удельным импульсом (сотни секунд), а электрические двигатели наоборот, при обычно очень малой силе тяги обладают высоким удельным импульсом (тысячи секунд), поэтому первые используют для кратковременной работы с повышенной силой тяги, а вторые — при длительной работе и малой силе тяги.

1.1. Твердотопливные РМД

Первые разработки РМД по технологии МСТ в основном посвящены РМДТТ, работающим при зажигании (воспламенении) и активном самопроизвольном горении твердого ракетного топлива. В отличие от жидких и газообразных рабочих сред при использовании твердого топлива не требуются герметичные системы хранения и подачи топлива, которые должны выдерживать повышенные давления и исключать утечки. Твердое ракетное топливо хорошо сохраняется в рабочей камере и имеет большое удельное тепловыделение при сгорании (около 5 МДж/кг) при малых затратах энергии на зажигание и высокой скорости горения. Это позволяет создавать малые по объему и массе, простые и сравнительно дешевые РМДТТ с малым числом образующих их основных компонентов и встроенной системой управления зажиганием. Такие двигатели способны создавать большую силу тяги, но малый удельный импульс вследствие малого КПД тепловых двигателей.

Теоретические расчеты с использованием термодинамических и кинетических подходов и ком-

пьютерное моделирование процессов, протекающих при работе РМДТТ, имеют важнейшее значение с точки зрения оценки основных рабочих характеристик двигателей — силы и импульса тяги, а соответственно, и их конструкторско-топологических параметров, технологических способов и режимов производства. Однако при всей простоте функциональной схемы твердотопливных ракетных двигателей точный расчет их рабочих характеристик представляет собой сложную задачу. Сложность протекающих при работе таких двигателей процессов (воспламенения и горения твердого топлива, динамики газообразных продуктов горения, их тепло- и массообмена) при различных граничных условиях затрудняют расчеты и моделирование даже для идеальных макро- или мезоскопических систем. Переход к микромасштабу приводит к нарушению принципа масштабной инвариантности, что еще больше усложняет эти задачи. Поэтому, хотя вопросам расчетов и моделирования РМДТТ посвящено достаточно много работ [13, 36], получаемые при этом результаты дают существенное отклонение от экспериментально определяемых. Очевидно, что причинами этого служат трудности учета всех факторов, необходимых при решении уравнений Навье—Стокса, обобщающих сохранение массы, энергии и импульса (момента) в соответствующих процессах при соответствующих граничных условиях и геометрических параметрах камер и сопел и служащих основой всех подходов к расчетам и моделированию РМДТТ. Решения этих уравнений требуют знания и учета состава и свойств потока продуктов горения топлива, резко отличных от состава и свойств идеального газа (давления, температуры, плотности, теплоемкости, коэффициентов диффузии, теплопроводности и теплопередачи, скорости и гомогенности потока и соответствующих безразмерных параметров — чисел Кнудсена, Прандтля и других, наличия или отсутствия ударных волн и разрыва потока), поверхностных и объемных свойств материалов, из которых изготовлены камера и сопло, а также эффектов граничных слоев. Для решения этих проблем используют методы внутренней баллистики — области науки, которая изучает газодинамические процессы в оружейных ствольных системах.

Индивидуальные РМДТТ действуют кратковременно, т. е. являются одноразовыми короткоимпульсными, и обладают малой силой и импульсом тяги, пропорциональным их размерам. Эти недостатки нивелируются в технологии МСТ послойным набором (в виде 2D-топологии) заданного количества (массива) индивидуальных микродвигателей в слое в сочетании с общей системой управления порядком и последовательностью их зажигания для создания требуемого импульса в заданном месте и требуемом направлении и отделения слоя

после отработки всех двигателей в нем, т. е. созданием "умных" систем РМДТТ с "цифровым" программным управлением (рис. 1, а, см. вторую сторону обложки). Такие системы способны создавать силу тяги порядка нескольких миллиньютонов (мН), достаточных для систем ориентации и изменения орбиты микро- и наноспутников с массой более и менее 10 кг соответственно.

В подавляющем большинстве случаев индивидуальные РМДТТ, изготавливаемые по технологии МСТ в одном чипе, состоят из трех основных компонентов: камеры сгорания, теплового элемента зажигания и сопла для выхода продуктов горения (рис. 1, б, см. вторую сторону обложки). В связи с этим разрабатываемые в разных странах конструкторско-топологические схемы индивидуальных РМДТТ сравнительно просты и мало отличаются друг от друга, как и используемые при их изготовлении стандартные технологии МСТ. Основные проблемы и отличия в создании систем РМДТТ связаны с выбором материалов для изготовления их элементов по технологии МСТ, способа соединения элементов, типа твердого топлива и системы зажигания.

В качестве материалов, образующих основные элементы РМДТТ, обычно используется кремний и его производные (оксид и нитрид), а также жаростойкие неорганические стекла и керамика [7]. При этом соединение однородных или разнородных компонентов РМДТТ или их элементов и корпусирование обычно осуществляется с помощью клеев или сварки. Системы зажигания в РМДТТ обычно являются терморезистивными, изготавливаемыми в каком-либо компоненте конструкции двигателя или в виде отдельного элемента.

Топливо для РМДТТ наряду с заданными рабочими характеристиками должно обладать технологичностью — начальной текучестью для заполнения камер с переходом в твердое эластичное состояние с малыми усадками и иметь высокую адгезию к стенкам камеры. Низкая температура и энергия возгорания обычно обеспечиваются введением стифаната (2,4,6-тринитрорезорцината) свин-

ца, ТНРС $C_6H(NO_2)_3O_2Pb$), температура возгорания которого равна 275 °С. В табл. 1 приведены рабочие характеристики одного из типов твердого ракетного топлива на основе полибутадиенового жидкого каучука с концевыми гидроксильными группами (НТРВ) и перхлората аммония (АР) [8].

Перспективными являются также низковязкие в исходном состоянии композиции на основе полимерных азидов с концевыми эпоксидными группами и перхлората аммония. В том случае, когда твердое топливо сгорает равномерно, т. е. фронт горения перемещается от поверхностных слоев вглубь заряда с одинаковой скоростью во всех точках, давление в камере сгорания p_k и тяга РМДТТ при неизменной площади минимального сечения (горловины) сопла пропорциональны размерам горячей поверхности и скорости горения топлива u . В простейшем случае скорость горения топлива u зависит лишь от p_k и температуры. Для большинства применяемых типов топлива наблюдается степенной закон зависимости u от p_k с показателем степени 0,2...0,9. При $p_k = 4...7$ МПа значение u составляет для медленно горящих типов топлива 2...6 мм/с, для топлива со средней скоростью горения 6...15 мм/с, для быстро горящих типов 30...60 мм/с. При увеличении (уменьшении) температуры заряда на 10 °С скорость горения увеличивается (соответственно, уменьшается) в среднем на 2...5 %.

1.2. Электрические коллоидные РМД

Из большого числа способов создания реактивной тяги за счет превращения энергии электрического или электромагнитного поля в кинетическую энергию заряженных частиц путем их распыления наиболее перспективным при разработке РМДЭК по технологии МСТ является использование в качестве рабочего тела токопроводящей жидкости и его капиллярной подачи. Такая жидкость заполняет капилляр под действием сил поверхностного натяжения и при приложении к капилляру и заземленному контрэлектроду (кольцевому экстрагирующему электроду) высокого напряжения образует на выходе из капилляра конус Тейлора, распыляясь и ускоряясь при потере его устойчивости (рис. 2).

Под действием поверхностного натяжения мениск жидкости на выходе из капиллярного электрода при угле смачивания его поверхности жидкостью меньше 90° имеет выпуклую полусферическую форму (см. рис. 2, а). Приложенное к капилляру положительное напряжение V индуцирует в мениске электрическое поле $E = \frac{2V}{r \ln(4d/r)}$, где r — радиус кривизны мениска; d — расстояние до контрэлектрода. Это поле вызывает поляризацию жидкости (миграцию носителей отрицательных и

Таблица 1
Рабочие характеристики
твердого ракетного топлива НТРВ/АР [8]

Характеристическая скорость, м/с		1379,4
Температура пламени, К		2046
Плотность, г/см ³		1,625
Удельная теплоскорость, Дж/г · К		1,5
Скорость горения, мм/с	Предэкспоненциальный множитель	5,52
	Показатель степени	0,45
Относительная теплотворная способность		1,25

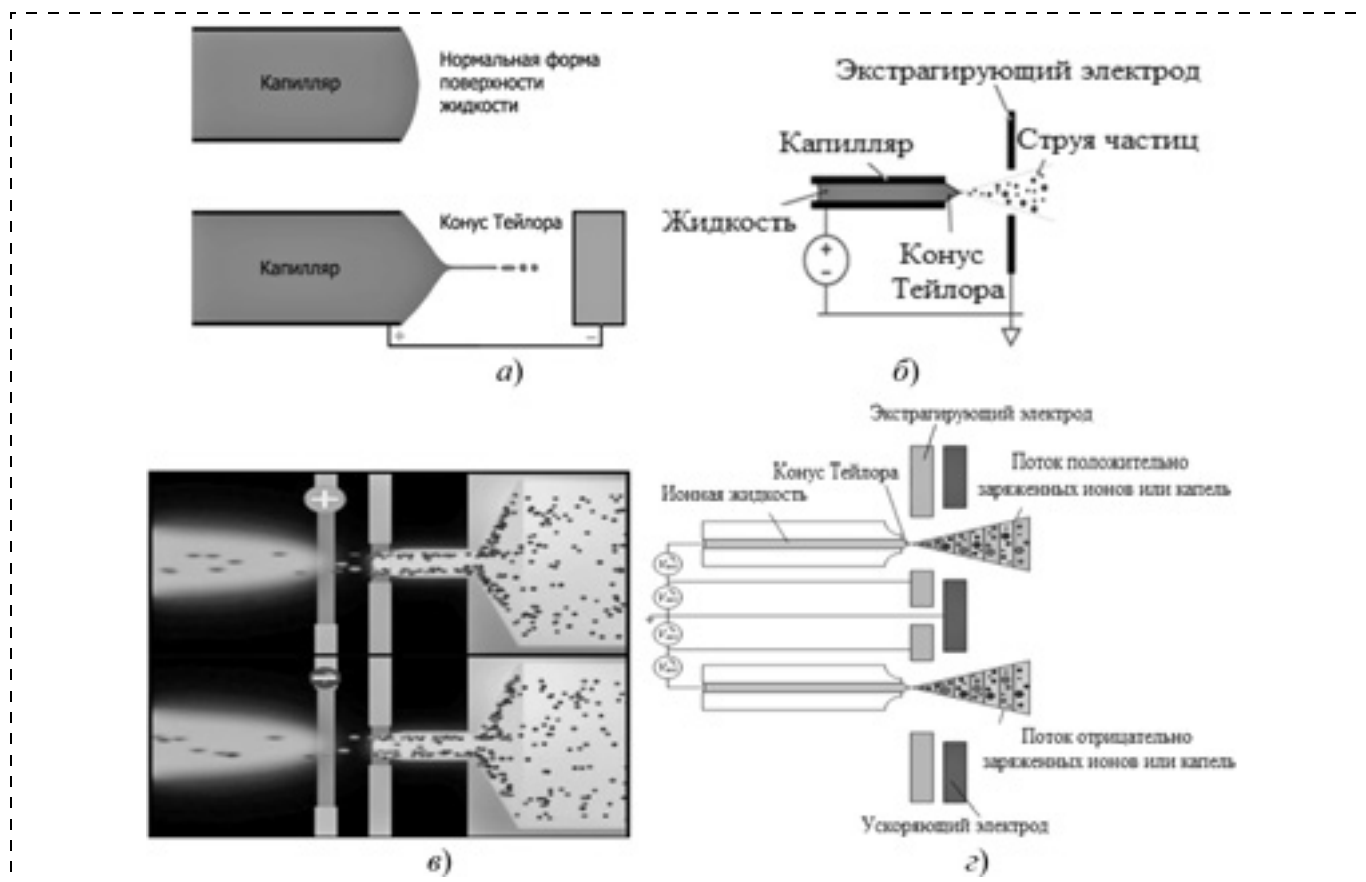


Рис. 2. Схематические изображения формирования конуса Тейлора в эмитирующем капиллярном электроде (а), электрораспыления токопроводящей жидкости (б) и дисперсии заряженных частиц (в), а также электрораспыления ионной жидкости с использованием двух эмитирующих электродов с противоположной полярностью для обеспечения электронейтральности, позволяющей избежать возникновения объемного заряда в емкости с жидкостью (г) [12]

положительных зарядов, соответственно, к электроду и от электрода, к которому приложено напряжение) и возникновение кулоновской электростатической силы, деформирующей мениск, придавая ему форму конуса. Тейлор показал, что при напряжении, меньшем некоторого критического, и при условии, что поверхность конуса является эквипотенциальной, конус находится в устойчивом равновесном состоянии. Однако при напря-

жении, превышающем критическое, и при достижении углом конусности предельного значения в $98,6^\circ$ конус теряет устойчивость вследствие сингулярности радиуса кривизны его кончика с образованием очень тонкой струи жидкости, разбивающейся на заряженные наночастицы вплоть до отдельных ионов (рис. 3).

Конус на кончике теряет устойчивость, когда гидродинамическое время релаксации ($\tau_H = \frac{\mu r}{\gamma}$) становится больше времени релаксации зарядов ($\tau_Q = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\sigma}$), где μ — вязкость; γ — удельная поверхностная энергия; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость и σ — удельная электропроводность жидкости; r — радиус кривизны мениска жидкости; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Эффективная скорость истечения реактивной струи $v_{эф}$ (м/с) при этом определяется удельным зарядом капель — отношением заряда к массе (q/m), а также ускоряющим потенциалом ϕ : $v_{эф} = \sqrt{2} (q/m) \phi$. Экспериментально удельный заряд капель определяется как отношение тока эмис-

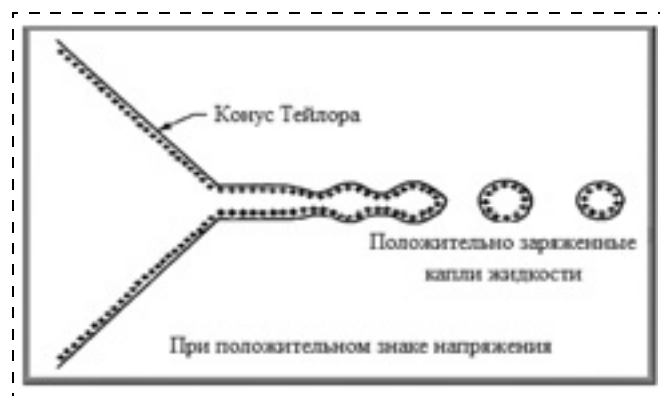


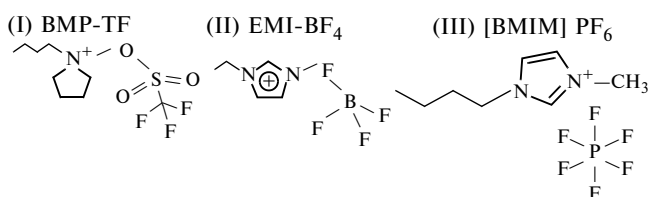
Рис. 3. Схема возникновения и разрушения струи при потере устойчивости конуса Тейлора при положительном знаке напряжения в нем

сии пучка I_e к скорости потока массы $\dot{m}$: $\frac{q}{m} = \frac{I_e}{\dot{m}}$,
а теоретически — по критерию Рэлея: $\frac{q}{m} = \frac{3(\varepsilon_0 \gamma)^{1/2}}{\rho r^{3/2}}$,

где ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума;
 γ , ρ , r — поверхностная энергия, плотность и радиус каплей рабочей жидкости соответственно.

Для распыления токопроводящей жидкости помимо капиллярного предлагается использовать другие типы эмитирующих электродов (игольчатые, в виде заточенного карандаша или вулкана со срезанным верхом, на которые наносится слой жидкости и с которых эмитируются заряженные частицы при повышенном напряжении). Возможны и другие способы электрораспыления, в частности, с использованием мембранного электрода со слоем ионной жидкости, который подвергается вибрации с помощью пьезоактюатора с формированием в жидкости стоячей волны вблизи предела атомизации жидкости [14]. Приложенное к контр-электроду напряжение преодолевает поверхностное натяжение жидкости, отрывает и ускоряет заряженные капли. Принципиальная проверка этого принципа с использованием соленой воды показала, что при напряжении 3 кВ возникает ток заряженных частиц в 65 нА. В этом случае, так же как и в других некапиллярных методах, существуют проблемы подачи жидкости на эмитирующий электрод.

Распыляемые с эмитирующего электрода заряженные частицы ускоряются под действием экстрагирующего электрода и, проходя с высокой скоростью через отверстие в нем, создают реактивную тягу. В качестве рабочих тел при этом наиболее перспективны ионные жидкости и коллоидные дисперсии заряженных частиц, в частности, сегнетоэлектриков, на основе ионных жидкостей. В широком смысле к ионным жидкостям относятся любые расплавленные соли, однако в настоящее время под этим термином подразумевают соли, температура плавления которых ниже температуры кипения воды и которые при комнатной температуре находятся в жидком состоянии (*Room-Temperature Ionic Liquids*, RTIL). Наиболее важное значение среди них имеют малолетучие органические соли, такие как N-бутил-метил-пирролидиниум трифторсульфонил (BMP-TF), 1-бутил-3-метил-имидазолиум гексафторфосфат ([BMIM]PF₆) и 1-этил-3-метил-имидазолиум тетрафторборат (EMI-BF₄):



В качестве рабочего тела в РМДЭК также могут быть использованы малолетучие растворы солей, например иодистого калия KI в глицерине, и жидкие металлы или металлы с низкой температурой плавления, например ртуть или индий и висмут. Однако ртуть отличается высокой токсичностью и способностью легко растекаться по твердой поверхности, загрязняя устройство, а индий и висмут требуют предварительного плавления.

Электрические ракетные двигатели (РДЭ), работающие на принципе эмиссии заряженных ионов с использованием ионизированных инертных газов, обычно относят к ионным двигателям, а с использованием жидких металлов (*Liquid metal ion sources*, LMIS) — к электрораспылительным РДЭ с полевой эмиссией (*Field Emissions Electric Propulsion*, FEER). Электрораспылительные РДЭ, работающие на принципе эмиссии заряженных капель жидкости, относят к электрическим коллоидным ракетным двигателям (РДЭК). При использовании ионных жидкостей (расплавов солей) образуются как заряженные капли, так и ионы в зависимости от условий работы (скорости потока, температуры и напряжения) [15]. В данном обзоре двигатели, работающие на основе ионных жидкостей и изготовляемые по технологии МСТ, отнесены к электрическим коллоидным микродвигателям (РМДЭК).

В отличие от ионизируемых инертных газов, в частности ксенона, используемых для создания реактивной тяги в электрических ионных реактивных двигателях, ионные жидкости не требуют создания герметичных емкостей для хранения рабочей среды и позволяют регулировать ее потоки с помощью капиллярных и электростатических сил. Простота работы электрораспылительных ракетных двигателей делает их идеальным объектом для миниатюризации и изготовления по технологии МСТ [16]. В таких двигателях для повышения скорости движения частиц можно создавать систему ускоряющих электродов, а для использования обоих типов зарядов — переключать знак напряжения на электродах с заданной частотой. Для обеспечения электронейтральности двигателя во избежание возврата к нему распыленных заряженных частиц необходимо использовать специальный электрохимический нейтрализатор: при испускании только положительно заряженных частиц необходимо создавать также поток электронов. Это, соответственно, требует дополнительных затрат энергии и массы. Более эффективным способом обеспечения электронейтральности РМДЭК является параллельное соединение двух индивидуальных двигателей (см. рис. 2, в). При этом РМДЭК способны обеспечивать высокий удельный импульс вследствие высокой скорости движения заряженных частиц, высокую массовую эффективность рабочей жидкости и большую длительность непрерывной

работы. Однако технические возможности таких двигателей лимитируются объемным зарядом, создаваемым заряженными частицами и обусловливающим очень малую плотность тяги (отношение силы к поперечному сечению сопла) и, соответственно, очень малую силу тяги по сравнению с двигателями, работающими на твердом топливе. Лимитирующим фактором в РМДЭК является также то, что мощность, затрачиваемая на распыление заряженных частиц, находится в квадратичной зависимости от скорости их движения, тогда как сила тяги возрастает только линейно с увеличением скорости истечения заряженных частиц. Кроме того, для работы РМДЭК необходима большая разность потенциалов, т. е. большое напряжение, подаваемое на электроды, что требует соответствующего источника электрической энергии и высокого качества электроизоляции. Вместе с тем, хотя ускорение, обеспечиваемое РМДЭК, может составлять только тысячные доли стандартного ускорения силы тяжести, такие двигатели, как и все электрические (электростатические) имеют более высокий КПД, т. е. способны более эффективно превращать затрачиваемую энергию в кинетическую энергию движения заряженных частиц и в работу, чем твердотопливные двигатели.

К электростатическим РМДЭ, работающим по принципу, очень близкому к коллоидному, относятся двигатели, использующие полевую экстракцию твердых наночастиц (*Nanoparticle Field Extraction Thrusters*, NanoFETs). В этих двигателях твердые частицы заданных размеров извлекаются из порошка или коллоидной дисперсии в жидкости, помещенных в специальный резервуар [14, 17–19]. Использование наборов частиц различных размеров позволяет создавать заданный удельный импульс в зависимости от возникающих потребностей — повышенной тяги с малым удельным импульсом, или, наоборот, малой тяги с большим удельным импульсом при быстром маневрировании или медленном наборе скорости соответственно.

Для проверки этого принципа была использована дисперсия частиц Al диаметром 300 мкм и длиной 1,5 мм в силиконовом масле. Микронасос прокачивает дисперсию вблизи электрода, заряжающего частицы, которые после этого экстрагируются из дисперсии и ускоряются с помощью специальной электродной системы. При этом перспективным считается использование дисперсии углеродных нанотрубок. При эмиссии противоположно заряженных частиц не требуется нейтрализатор. К недостаткам жидких коллоидных систем относится необходимость их циркуляции около заряжающего электрода, испарение жидкости в вакууме, вязкое сопротивление жидкости экстракции частиц и сохранение ее слоя на поверхности частиц после их экстракции, а также необходимость

высокой электрической прочности жидкости. Использование сверхтонких сухих порошков позволяет избежать этих проблем, однако слипание частиц под действием ван-дер-ваальсовых сил требует вибрации резервуара с порошком или его просеивания с помощью пьезосистем. Проверочные испытания проводили с микросферами диаметром 50...305 мкм. Оценочные расчеты показывают, что использование порошка наночастиц золота диаметром 50 нм при напряжении 40 кВ обеспечит удельный импульс в 200 с, а порошков керамических сплошных и полых частиц такого же диаметра — 500 и 900 с соответственно. Однако экспериментально эти показатели не подтверждены. В других вариантах NanoFETs предлагается использовать набор эмиттеров, каждый из которых состоит из игольчатого электрода, заряжающего частицы при их осаждении на его поверхность [14]. Заряженные частицы отрываются и ускоряются под действием контрэлектрода. При этом возникают проблемы подачи частиц на заряжающий электрод. Поэтому очевидно, что по технологичности, требуемому рабочему напряжению и получаемому удельному импульсу метод экстракции частиц из дисперсий и порошков сильно уступает использованию ионных жидкостей.

Далее рассмотрены имеющиеся в литературе данные по разработкам твердотопливных и электрических РМД, изготавливаемых по технологии МСТ, осуществляемым в разных странах, и проблемы расчета таких двигателей и моделирования процессов, протекающих в них.

2. Американские разработки РМД по технологии МСТ [1, 2, 8, 9, 19–28]

Одними из первых предложений по разработке и использованию РМД были изложены в конце прошлого и начале нынешнего века в концепции "цифровых" микроспутников фирмы *Aerospace Corporation* [19] и НАСА [20] (рис. 4, см. вторую сторону обложки).

Простые расчеты показали целесообразность разработки РМД. Так, для регулирования высоты микроспутника массой 10 кг требуется импульс тяги 10 Н·с. При импульсе тяги одного микродвигателя 1 мН·с потребуется 10^4 таких двигателей, т. е. их набор (массив) 100×100 . При размере одного микродвигателя 1×1 мм требуемая площадь составляет 100 см², что не превышает половины площади поверхности микроспутника [7]. На рис. 5 приведены схема РМДТТ фирмы *Aerospace Corporation* и микрофотография массива таких двигателей на керамической платформе после проведения их испытаний.

Основные работы в США по разработке РМДТТ и РМДЭК по технологии МСТ проводили по заданиям НАСА, научно-исследовательских департа-

ментов Министерства обороны и военно-воздушных сил ((*DARPA, AFOSR*) исследовательскими группами ряда университетов в рамках проектов наноспутников *CubeSats* и *Emerald* массой до 1 кг. Эти проекты были предназначены для обучения студентов и аспирантов принципам создания космических систем и проверки новых систем и технологий, в первую очередь, технологий МСТ (МЭМС) для изготовления РМД (рис. 6).

К настоящему времени разработаны около 80 спутников *CubeSats* с РМДТТ, из которых 40 были запущены с помощью российских, американских, японских и индийских ракет (рис. 7, см. третью сторону обложки).

Совместными разработками Массачусетского технологического института и Йельского университета РМДЭК по кремниевой технологии МСТ получены линейные и 2D (с увеличенной плотностью упаковки) наборы микрораспылителей ионных жидкостей на основе некапиллярных самовыравнивающихся эмитирующих электродов [24–28]. Для улучшения смачивания поверхности эмитирующих электродов при их вытравливании использовали хлорсодержащую плазму (получали "черный" кремний). При использовании ионной жидкости ЕМІ-BF₄ и вулканоподобных эмитирующих электродов получен ток заряженных частиц силой $2 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-1}$ мкА на один эмиттер.

РМДЭК как альтернатива РМДТТ с планируемой тягой 1...20 мкН и удельным импульсом 1000 с разрабатывали в США также по межуниверситетской программе наноспутников *Emerald* (рис. 8) [19, 20].

Целью разработки РМДЭК на основе технологии МСТ по проекту iEPS (*ion Electro spray Propulsion System*) было создание вспомогательных микродвигателей для коррекции орбиты нано- и пикоспутников *CubeSats* и основных микродвигателей для вывода таких спутников в межпланетное пространство с приданием им второй космической скорости. Такие мик-

родвигатели, занимая не более 20...30 % объема однокилограммового спутника, имея всего 150 г ионной жидкости и обладая удельным импульсом 2500...3000 с, способны выводить спутник с околоземной орбиты в межпланетное пространство.

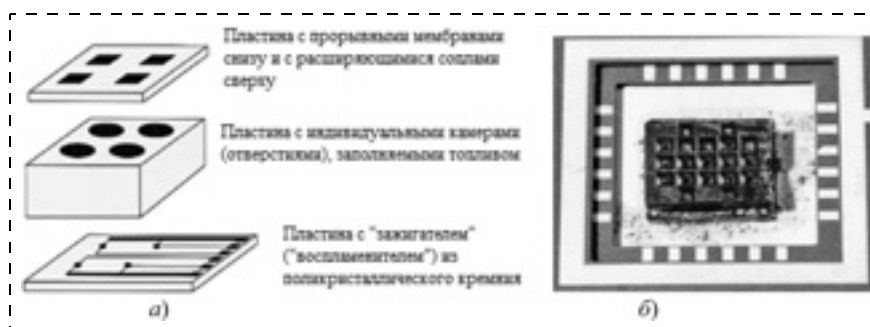


Рис. 5. Элементы сборки "цифрового" РМДТТ фирмы *Aerospace Corporation* без электроники (а) и микрофотография чипа с такими двигателями на керамической платформе после испытания (б) [9]

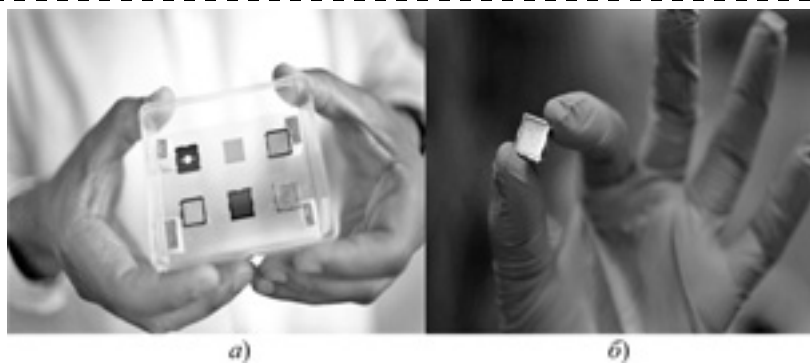


Рис. 6. Компоненты (а) и чип (б) разработанного в МІТ РМДТТ для наноспутников *CubeSats*

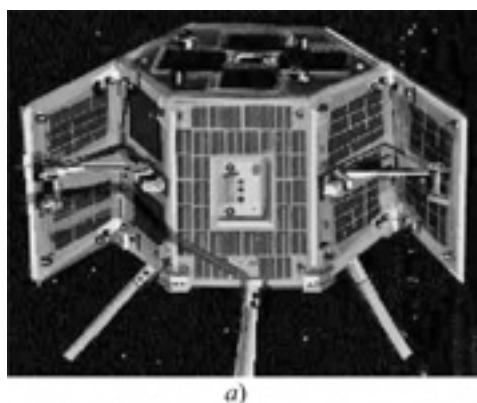
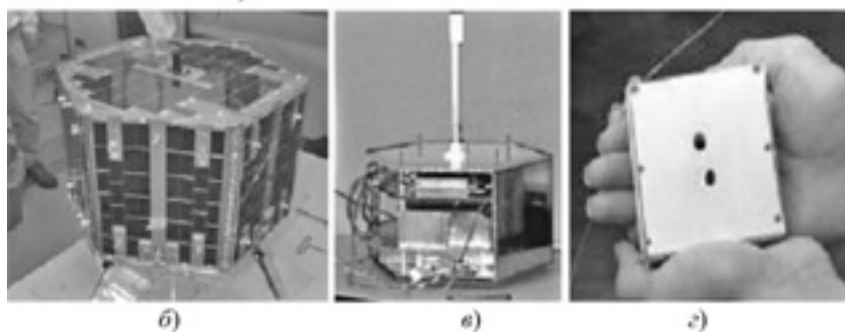


Рис. 8. Общий вид микро- (а, б), нано- (в) и пико- (г) спутников, разработанных по программе *Emerald* [19–20]



3. Европейские разработки РМД по технологии МСТ [3—10, 12, 29—41]

Первые и наиболее подробно описанные разработки РМДТТ в Европе по технологии МСТ были осуществлены совместными усилиями университетов и лабораторий нескольких стран: Франции (LAAS-CNRS); Германии (IMTEK в Университете Фрейбурга, RUAGAmmotecGmbH); Швейцарии (RUAGAerospace, SeyonicSA, EPFL — Федеральный политехнический университет Лозанны, SAMLAB — Лаборатория космических микросистем Университета в Нойшателе); Нидерландов (Технический университет Делфта) [29—31]. При этом была поставлена задача разработки (для микроспутников массой до 100 кг) массива РМДТТ, состоящих из четырех компонентов с зажигателем

(воспламенителем) в виде специальной мембраны и обеспечивающих силу тяги в несколько десятков миллиньютонов (мН) и удельный импульс более 100 с. Были разработаны, изготовлены и испытаны опытные образцы (демоверсии) таких наборов, схематическое изображение, микрофотография и чертеж которых приведены на рис. 9.

На рис. 10 приведены электронные микрофотографии последовательно изготавливаемых компонентов РМДТТ. При этом общие размеры демоверсий индивидуального двигателя в плоскости составляли 1×1 и $0,5 \times 0,5$ мм с варьированием размеров отдельных элементов: диаметра горловины сопел — 275, 375 и 500 мкм; площади зажигателей — 180×180 , 390×390 и 720×720 мкм (их сопротивление изменялось от 830 до 3340 Ом); размеры камер в кремнии — 500×500 мкм с канавками 50 мкм (слева) и 250 мкм (справа); размеры углублений в стеклянной пластине — 500×500 мкм [6]. Сборку массива РМДТТ осуществляли последовательно попарным соединением чипов с воспламенителями и соплами и с камерами сгорания и днищем, заполнением камер отверждающейся топливной композицией и склеиванием полученных элементов эпоксидным клеем для соединения кремниевых пластин и использованием анодной сварки для соединения кремниевых и стеклянных пластин.

На рис. 11 представлены вид РМДТТ, изготовленного по технологии МСТ, и результаты его стендового испытания. При испытании энергия зажигания индивидуального двигателя варьировалась от 60 до 375 мВт при подаваемом постоянном токе от 7,0 до 7,75 мА, время горения составляло от 10 до 15 мс. Максимально достигаемая сила тяги варьировалась от 12 до 23 мН [6].

В последующей модификации РМДТТ число компонентов (блоков) в конструкции индивидуального двигателя было уменьшено с четырех до двух с отдельно расположенным зажигателем на верхнем блоке (рис. 12) и с переходом на более простую стандартную технологию МСТ SOI (кремний на изоляторе), что позволило существенно уменьшить размеры и повысить надежность работы двигателей.

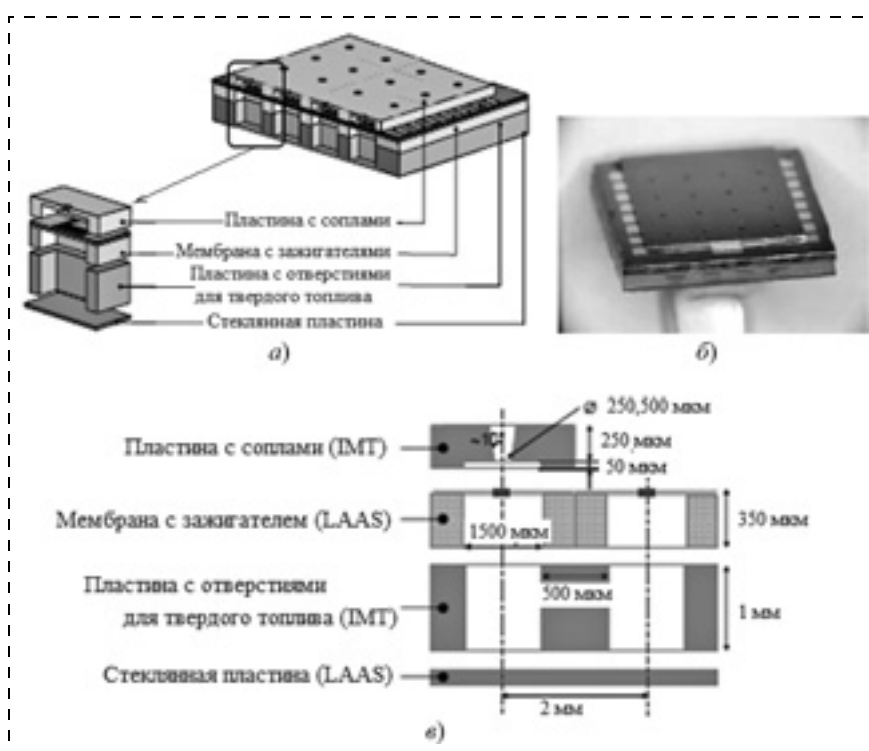


Рис. 9. Схема (а) и микрофотография (б) совместной опытной европейской разработки массива РМДТТ на керамической основе и чертежи компонентов индивидуального двигателя с указанием размеров (в)

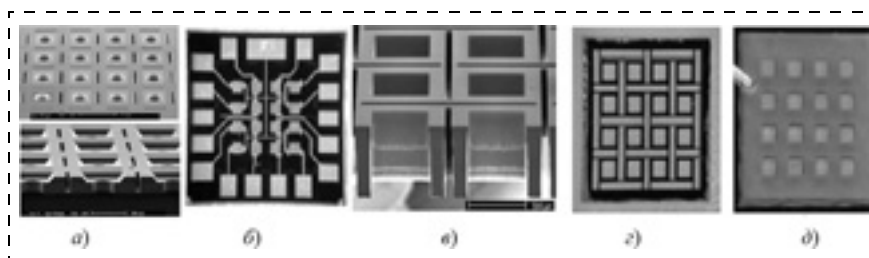


Рис. 10. Электронные микрофотографии последовательно изготавливаемых компонентов (чипов массива РМДТТ):

а — пластина с соплами в виде конических углублений и цилиндрической горловины; б — мембрана с зажигателем; в, г — пластины с камерами сгорания; д — днище — нижняя стеклянная пластина с углублениями

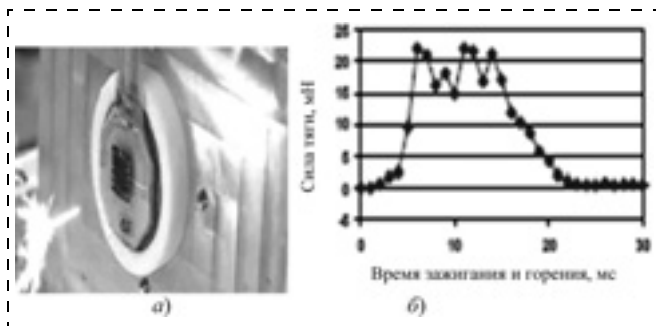


Рис. 11. Микрофотография РМДТТ на испытательном стенде (а) и типичная кривая изменения силы тяги во время зажигания и горения твердого топлива (б) [6]

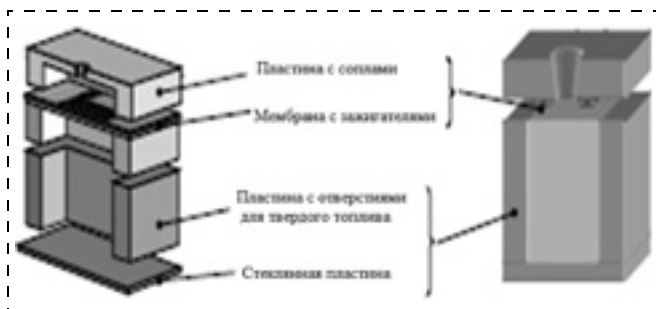


Рис. 12. Схема перехода от четырех- к двухкомпонентной конструкции РМДТТ

Таблица 2

Значения характерных размеров основных элементов микродвигателей, изготовленных по технологии SOI [6]

Диаметры камер для твердого топлива, мкм	Ширина стенок между камерами, мкм	Ширина канавок в стенках, мкм	Диаметры сопел, мкм
500	250	50	50...240
	500	200	
275	225	50	100...130
	475	175	

Применительно к нано- и пикоспутникам (с массой от 1 до 0,1 кг), в частности для швейцарского наноспутника типа *Cubesat* — *SwissCube*, были разработаны, изготовлены по технологии SOI и испытаны опытные образцы наборов 4×4 двухкомпонентных микродвигателей уменьшенных размеров на чипе 8×8 мм (рис. 13).

В табл. 2 приведены значения характерных размеров основных элементов таких микродвигателей.

На рис. 14 (см. четвертую сторону обложки) приведены данные об устройстве системы зажигания массива микродвигателей, изготовленного по технологии SOI с *p-n*-переходом.

Исследования зажигания таких двигателей при подаче постоянного тока силой от 10 до 24 мА на одну спираль показали, что продолжительность зажигания варьировалась от 6 до 24 мс, затрачиваемая мощность и энергия — от 255 до 400 мВт и от 1,6 до 11,8 мДж соответственно. Рабочие характеристики двигателей не приводятся.

Основной Европейский проект по разработке РМДЭК (*MicroThrust*) осуществлялся в 7-й Рамочной программе Европейской комиссии (FP7) консорциумом исследовательских групп, включающим Лабораторию микросистем для космических технологий Технического университета Лозанны (EPFL-LMTS), Швейцария, как основного разработчика; группу профессора Дж. Старка Лондонского университета королевы Марии, специализирующуюся в физике электрораспыления ионов; компанию *NanoSpace AB* (часть Шведской космической корпорации) — разработчика системы подачи и контроля рабочей жидкости и подразделение *Systematic Design* голландской организации прикладных научных исследований; TNO — разработчика электрической системы двигателя [31–40]. Исследователи из EPFL-LMTS совместно с другими членами консорциума создали прототип РМДЭК для расширения возможностей нового поколения (после *Cubesat*) малых (нано) спутников с объемом порядка 1 л — изменения их околоземной орбиты или даже доставки в дальний космос. Масса двигателя не превышает 200 г, включая резервуар с рабочей жидкостью, управляющую и контролирующую электронику. Общий вид РМДЭК *MicroThrust*, его отдельного элемента и компонентов показаны на рис. 15.

В двигателе ионная жидкость поступает из резервуара по капиллярам к кремниевым микросоплам, число которых на 1 см² чипа превышает 1000 (рис. 16).

Система распыления ионов требует напряжения в 1 кВ, что при малых размерах наноспутников с мощностью солнечных батарей около 4 Вт и необходимости хорошей электроизоляции, представ-

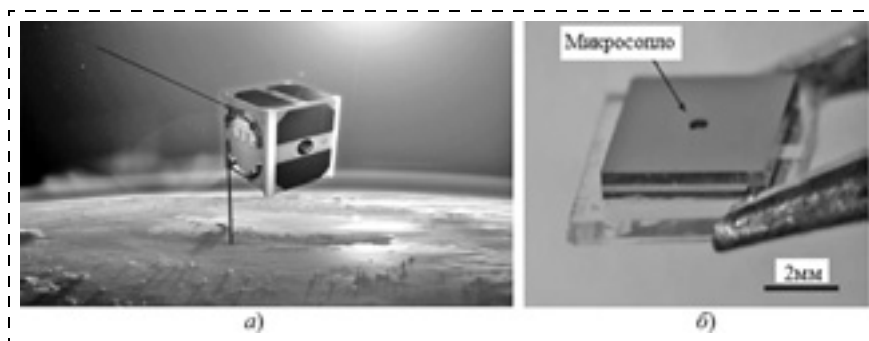


Рис. 13. Художественное изображение швейцарского спутника типа *Cubesat* — *SwissCube* на орбите, запущенного в космос в сентябре 2009 г. (а) и микрофотография индивидуального двухкомпонентного микродвигателя в сборке, изготовленного совместно RUAG и EPFL (б) [6]

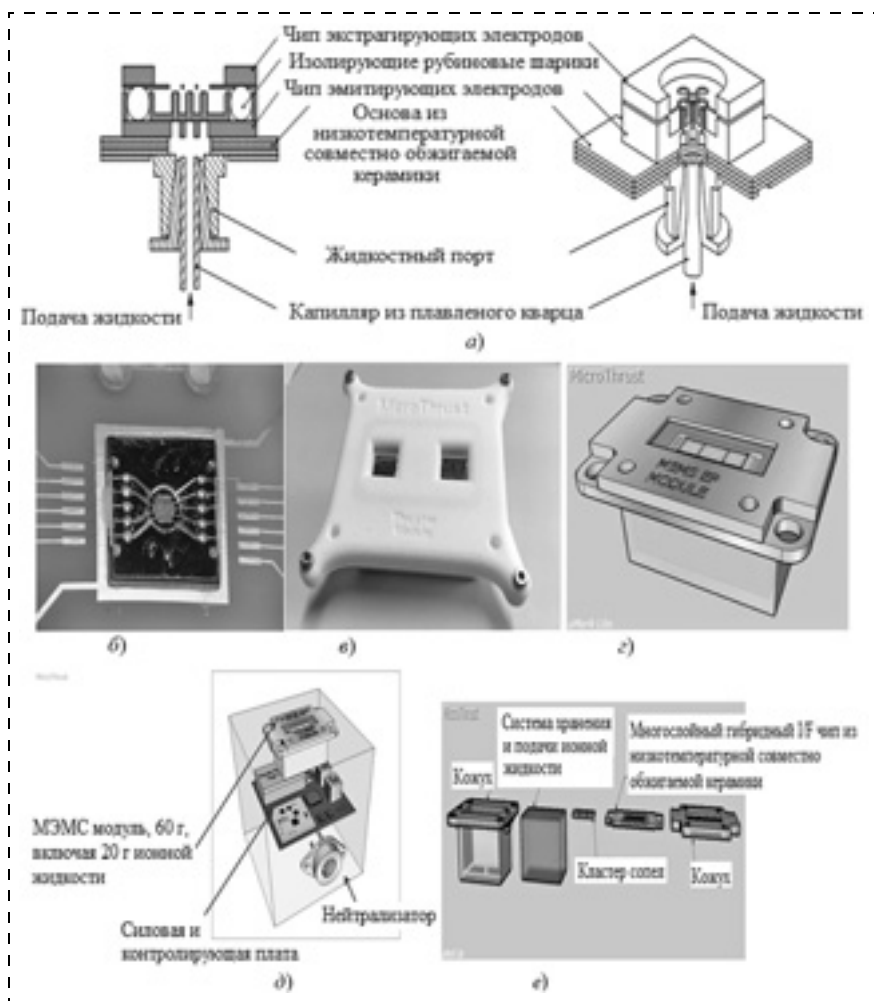


Рис. 15. Поперечное сечение (масштаб не соблюден) (а) и фотография в полном сборе (б) элемента РМДЭК *MicroThrust*; общий вид РМДЭК *MicroThrust* в корпусе из полиэфирэфиркетона (ПЕЕК) (в), его отдельного МЭМС-модуля (г), МЭМС-модуля в сборке с силовой и контрольной платой и нейтрализатором (д) и его отдельных компонентов (е)

ляет достаточно сложную задачу, которую удалось решить подразделению *SystematIC Design TNO*. Для обеспечения использования обоих типов ионов напряжение в двигателе изменяется на противоположное каждую секунду.

Разработанный двигатель может обеспечивать ускорение всего в десятки доли миллиметров за 1 с^2 (мм/с^2), т. е. для увеличения скорости наноспутника на 100 км/ч требуется 72 ч. Однако при этом способность двигателя к длительной работе позволит за 6 мес с затратой всего 100 мл ионной жидкости увеличить скорость наноспутника от первой космической скорости при запуске (около 24 000 км/ч или 7,9 км/с) до второй космической скорости (около 42 000 км/ч или 11,2 км/с).

В разработке Лондонского университета в кооперации с Техническим университетом Лозанны по программе *MicroThrust* на пластине кремния диаметром 100 мм был изготовлен РМДЭК с эмиттерами в наборе по 19 штук с внешним и внутренним диаметром капиллярного электрода 34 и 24 мкм

соответственно, заполненного микросферами диоксида кремния диаметром 4,74 мкм (рис. 17).

Микросферы SiO_2 , обработанные силанами и позволяющие регулировать скорость подачи жидкости по капилляру, вводили с помощью их дисперсии в спирте. После испарения спирта микросферы частично связывали друг с другом дополнительным нагреванием для прохождения реакций силанов. При использовании ионной жидкости EMI-BF_4 один набор микроэмиттеров обеспечивал усилие тяги 40 пН, т. е. примерно 2 пН на один эмиттер при напряжении 1,2 кВ [39].

При разработке РМДЭК по программе *MicroThrust* показан большой потенциал в интеграции всех элементов в виде субсистем, например, интеграция субсистем хранения, распределения, контроля скорости подачи и утилизации ионной жидкости, тесно связанных с физическими процессами смачивания и электросмачивания и определяющих ее электрораспыление. При этом консорциуму удалось решить большое число научных и технологических задач по контролю электрораспыления, нейтрализации потока заряжен-

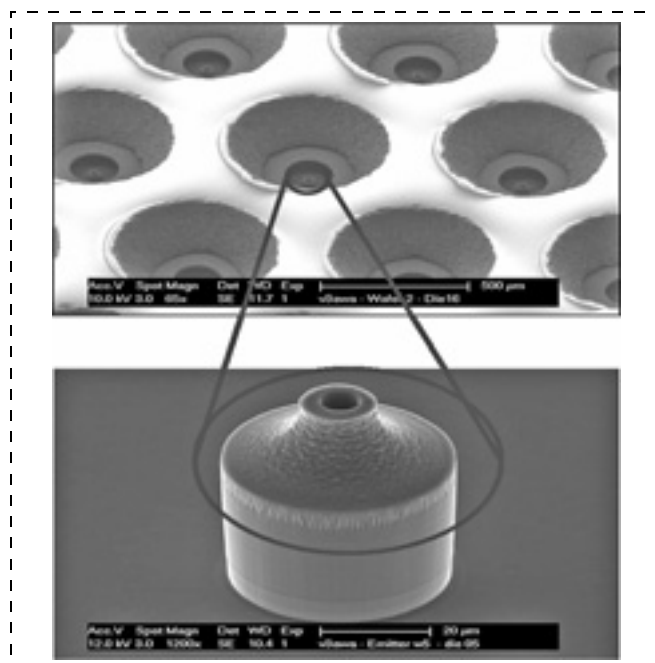


Рис. 16. Микрофотография кремниевых микросопел РМДЭК *MicroThrust*

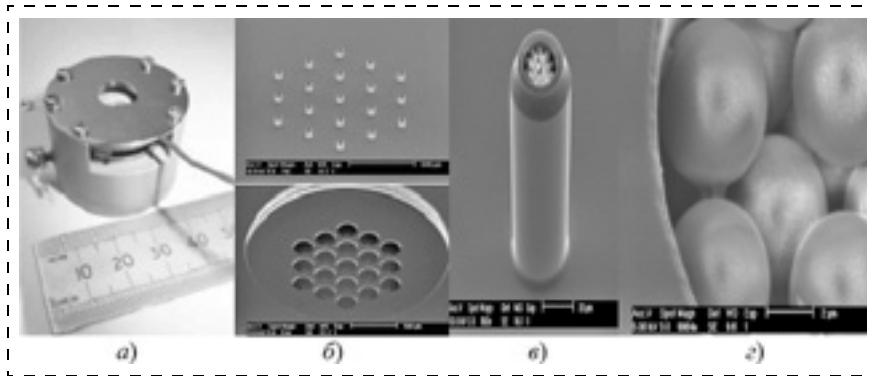


Рис. 17. Фотографии общего вида РМДЭК Лондонского университета (а), набора эмиттеров (б) и капиллярного электрода, заполненного микросферами SiO_2 (в, г)

ных частиц, совместимости материалов, их микро-обработке, соединению и сборке при корпусировании, интеграции всех элементов, струйного поведения, обеспечению высокой компактности, регулированию напряжения в цепи постоянного тока в сочетании с обеспечением высоковольтной изоляции и переключения.

4. Разработки РМД по технологии МСТ в КНР [42—50] и других странах Юго-Восточной Азии [51—53]

Основные разработки РМД по технологии МСТ в этих странах относятся к твердотопливным двигателям [42—48]. С начала этого века в разработках РМДТТ в КНР использовали трехкомпонентную схему (рис. 18), близкую к четырехкомпонентной европейской разработке для микроспутников (см. рис. 9, а).

Верхний и средний блоки получали из монокристаллического кремния травлением в индуктивно связанной плазме, а нижний блок — из неорганического стекла, травление которого осуществляли жидкостным способом. Два первых блока соединяли анодной сваркой до заполнения отверстий твердым топливом, а средний и нижний блоки — склеиванием после заполнения отверстий и углублений твердым топливом.

На рис. 19 показаны сканирующие электронные микрофотографии среднего (рис. 19, а) и нижнего (рис. 19, б) блоков, полученных разными способами. На

технологии производства за счет исключения травления сквозных отверстий, использования технологии SOI и бесклеявого соединения отдельных блоков, а также повысить эффективность двигателей за счет нанесения теплоизолирующих жаростойких оксидных или нитридных слоев.

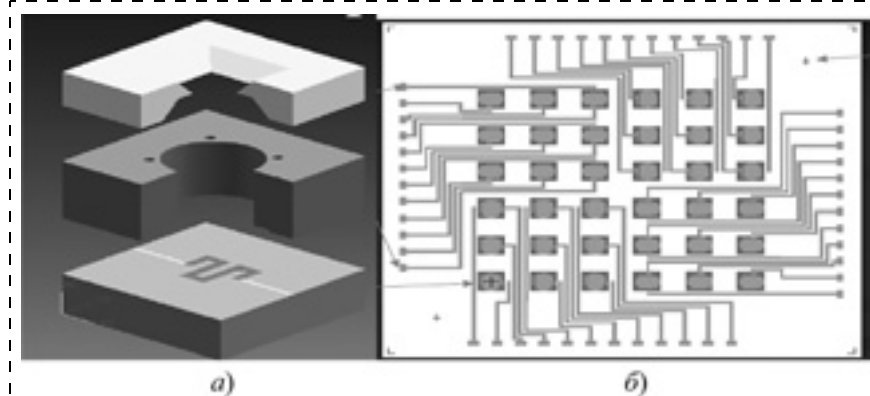


Рис. 18. Трехкомпонентная схема РМДТТ, разработанная в КНР (а): верхний блок с соплом квадратного сечения со сходящимися и расходящимися углами наклона стенок; средний блок с главным отверстием для заполнения твердым топливом и четырьмя малыми отверстиями для выхода газов; нижний блок с платиновым резистивным нагревательным элементом (зажигателем), и схема расположения воспламенителей с выводами на контактные площадки для набора двигателей 6×6 на нижнем блоке размерами 9×9 мм (б)

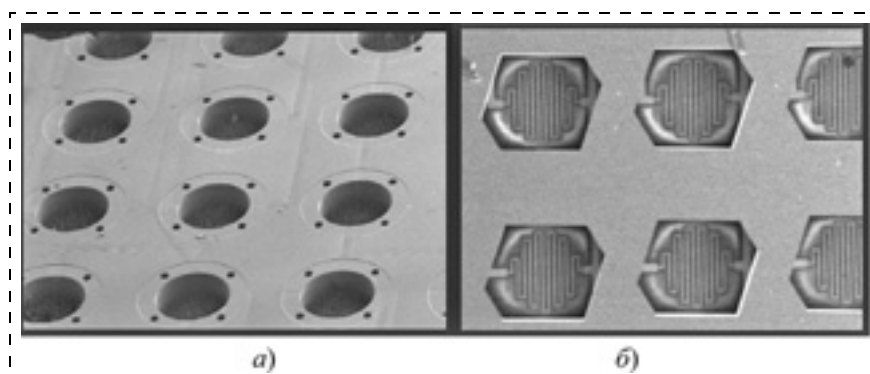


Рис. 19. Сканирующие электронные микрофотографии:

а — средний блок из монокристаллического кремния с основными и четырьмя дополнительными отверстиями, полученными травлением в индуктивно связанной плазме; б — нижний блок из стекла Прех-7740 с углублениями, полученными жидкостным травлением в растворе КОН, и платиновыми воспламенителями в них

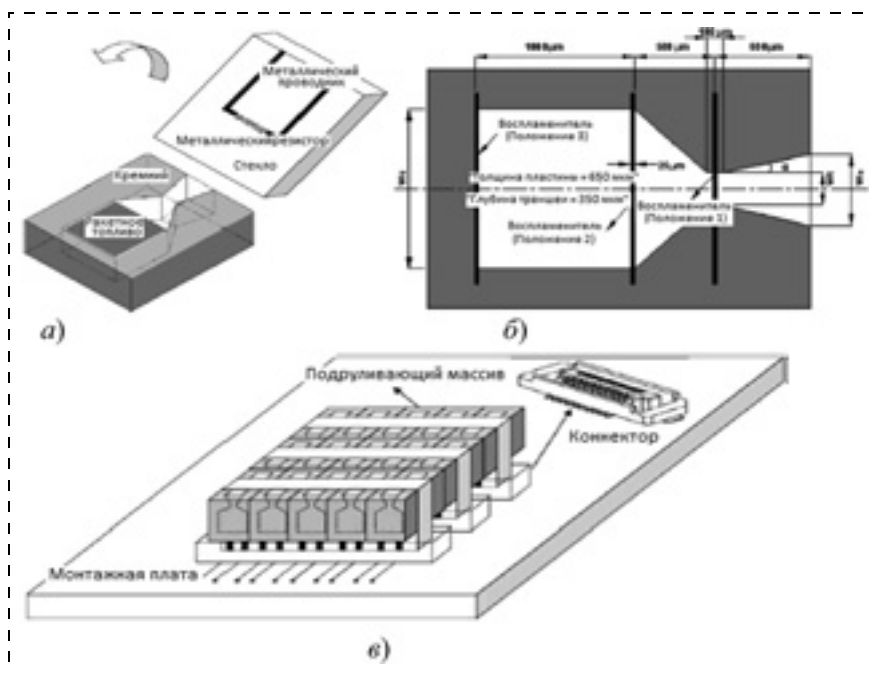


Рис. 22. Двухкомпонентная схема РМДТТ (а), геометрическая форма и размеры камеры и сопла (б) и схема набора двигателей на общей основе с контактными выводами и конвертерами (в) [10]

Разработки и исследования РДМЭК по технологии МСТ в Китае с начала этого века проводили в основном в Пекинском университете Цинхуа [49, 50]. Там были разработаны и испытаны два типа таких двигателей: на кремниевой основе и на основе печатных плат (рис. 23).

В первом случае на кремниевой подложке методами микрообработок был изготовлен набор из 192 эмиттеров (рис. 23, а). Испытания отдельного элемента из четырех эмиттеров, проведенные с помощью маятникового метода, показали усилие тяги 6,8 мкН при рабочем напряжении 1970 В (начало эмиссии наблюдалось при 1480 В). Информация об используемой рабочей жидкости отсутствует. В более простой и дешевой второй технологии (рис. 23, б) в слое меди, нанесенном на печатную плату, вытравили круглые отверстия, связанные с рабочей жидкостью, на которую подавалось напряжение. Вторая печатная плата с вытравленными отверстиями большего диаметра образовывала контрэлектрод. Набор содержал 81 эмиттер с внутренним диаметром 300 мкм и при испытании обеспечил тягу в 2,6 мкН. Данных об используемой рабочей жидкости также не сообщается. Испытания проводили в атмосфере, поэтому электрический пробой резко ограничивал прикладываемое напряжение. При разработке таких РМДЭК много усилий было затрачено на изготовление насоса по кремниевой технологии для обеспечения подачи рабочей жидкости со скоростью от 10 до 300 мкл/мин. Масса насоса составляла 20 г, размеры — $15 \times 15 \times 4$ мм и потребляемая мощность 200 мВт.

В других странах Юго-Восточной Азии, таких как Республика Корея, Япония, Тайвань, Сингапур, были разработаны РМДТТ, мало отличающиеся от американских и европейских [51–53]. При разработке РМДТТ использовали обе рассмотренные ранее конструкторско-топологические схемы: четырех- или трехкомпонентная с сухим плазменным травлением отверстий под камеры сгорания и сопла в монокристаллическом кремнии с отдельным блоком воспламенителей и двухкомпонентная с использованием технологии SOI (рис. 24, а и б соответственно).

В одной из разработок РМДТТ для регулирования высоты микроспутников массой около 10 кг (рис. 25) в качестве твердого топлива использовали смесь бора и нитрата натрия (NAB) с низкой температурой воспламенения (500 °С).

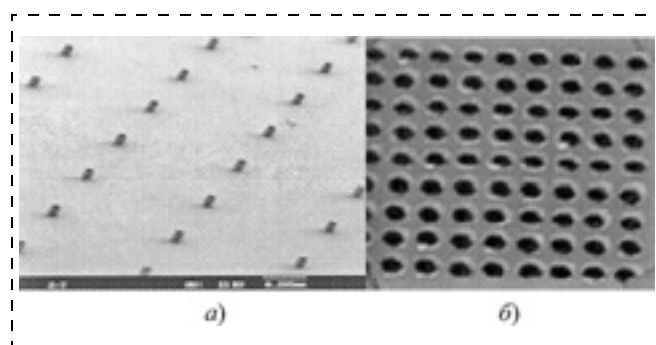


Рис. 23. Микрофотографии набора эмиттеров на основе кремния (а) и на основе печатных плат (б)

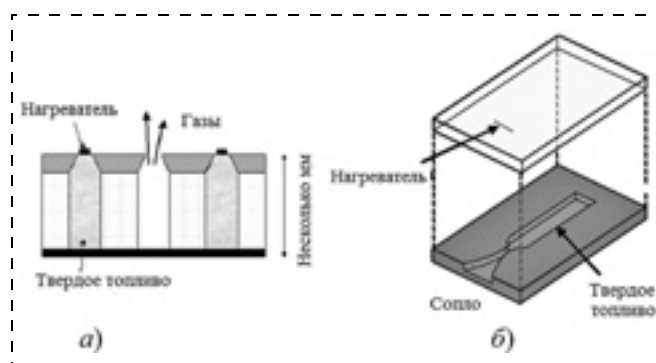


Рис. 24. Две конструкторско-топологические схемы РМДТТ южно-кореической разработки:

а — четырех- или трехкомпонентная схема с сухим плазменным травлением отверстий под камеры сгорания и сопла в монокристаллическом кремнии с отдельным блоком воспламенителей; б — двухкомпонентная схема с использованием технологии SOI

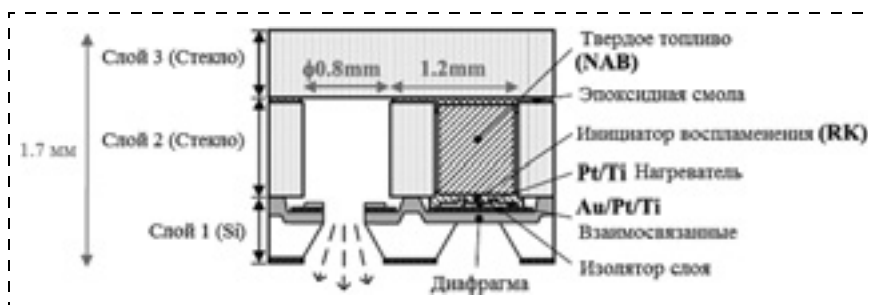


Рис. 25. Схема и размеры трехслойного РМДТТ

Испытание в вакууме показало, что двигатель дает максимальную силу тяги около $4,6 \cdot 10^{-4}$ Н, что равно примерно половине ожидаемого.

5. Отечественные разработки [54, 55]

В результате выполнения исследований в ЦНИИ РТК, ЗАО "Светлана — Электронприбор" в 2005—2006 гг. на основе анализа типов конструкций выбран тип многокомпонентного импульсного РМДТТ, принципиальная конструктивная схема которого приведена на рис. 26 [54].

Был осуществлен предварительный подбор конструкционных материалов и проанализированы характеристики технологических операций, пригодных для изготовления микродвигателя, разработаны конструкции и технологии изготовления макетов двух типов двигателя с нижним и верхним поджигом топлива, изготовлены и испытаны макеты двигателей. Приведены некоторые параметры макетных образцов: поперечный размер камер сгорания 0,6 мм, напряжение поджига ниже 28 В, число двигателей в массиве в экспериментальных образцах — 36 шт. Осуществляемый модульный подход к созданию схемы разводки питания микродвигателей и всего устройства в целом, позволяет увеличивать число двигателей в массиве. В работе также обсуждены общие вопросы конструирования

РМДТТ, технологические аспекты их изготовления, а также выявленные в ходе испытаний некоторые проблемы, связанные как с особенностями использованных конструкционных материалов, так и примененных технологических схем изготовления устройств.

Разработки РМДТТ проводятся также в научно-исследовательской лаборатории "Нано- и микро-

росистемная техника" Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. На рис. 27 приведены схемы и микрофотографии, показывающие возможные варианты проточных частей плоских сопел для РМДТТ, приведенные в работе [55].

Там же сказано, что разработанные технологии обеспечили создание демонстрационного образца РМДТТ. Другие какие-либо сведения об этих двигателях отсутствуют. Отсутствуют также данные о разработках РМДЭК.

В научно-исследовательском центре нанотехнологий ФГУП "ЦНИИХМ" ведутся работы по созданию РМДТТ, представляющего собой микросистемную сборку из управляющей платы, платы поджига и топливной платы. Миниатюрные системы поджига, выполненные по технологии микрообработки и включающие наноструктурированные материалы, имеют следующие преимущества: маленькие размеры, низкое энергопотребление, совместимость с интегральными схемами, дешевое массовое производство и обеспечение надежной работы инициатора. Топливная плата представляет собой кремниевую пластину со сквозными отверстиями, выполненными с большим аспектным соотношением по технологии глубокого анизотропного травления кремния.

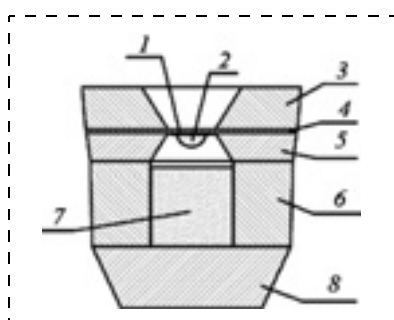


Рис. 26. Общая конструктивная схема РМДТТ:

1 — резистор поджига; 2 — топливно-инициатор; 3 — пластина с мембраной, расширяющимся соплом и резистором; 4 — мембрана; 5 — пластина с сужающимся соплом; 6 — пластина с отверстием; 7 — основное топливо; 8 — пластина-основание

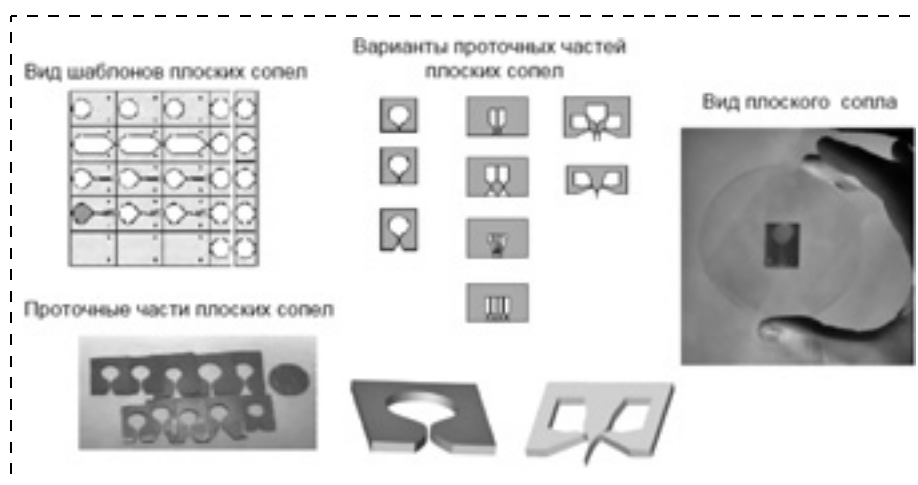


Рис. 27. Схемы и микрофотографии возможных вариантов проточных частей плоских сопел для РМДТТ

Заключение

Анализ мировых теоретических и прикладных исследований и разработок, а также практического применения микродвигателей, изготавливаемых по технологии микросистемной техники, показывает, что наибольшее внимание уделяется твердо-топливным и электрическим коллоидным реактивным микродвигателям (РМДТТ и РМДЭК). Во всех странах, в которых ведутся такие работы, используют достаточно близкие конструктивно-топологические варианты и технологические процессы производства двигателей. Очевидно, что надежность и эффективность таких двигателей в решающей степени определяются качеством изготовления и совместной работой их основных компонентов — топливного и иницирующего элементов и схемы управления. При этом важнейшее значение имеет решение проблем расчета, моделирования и испытания РМД и их элементов на всех стадиях разработки и практической реализации, производства и применения.

Список литературы

1. **Mission Design Division** Staff. Ames Research Center, Moffett Field, California. Small Spacecraft Technology State of the Art // NASA/TP-2014-216648/REV1, February 2014. P. 1—177.
2. **Meyer M., Johnson L., Palaszewski B.** et al. DRAFT NASA Technology Area Roadmap for In Space Propulsion Technologies, Technology Area 02, 2010, TA02-1-22. URL: http://www.nasa.gov/pdf/501329main_TA02-ID_rev3-NRC-wTASR.pdf
3. **Williams E.** ESA Technology Roadmaps. Brussels, 11 December 2013. <http://www.esa.int/ESA>
4. **De Rooij N. F., Gautsch S., Briand D.** et al. MEMS for Space // Transducers. June 21—25. 2009, P. 17—24. URL: <http://infoscience.epfl.ch/record/142366/files/MEMS%20for%20space.pdf>
5. **Sanders B., Van Vliet L., Tata Nardini F.** Development of MEMS Based Electric Propulsion, ESA Space Propulsion Conference, San Sebastian, Spain, 2010. P. 8—12.
6. **Gronland T. A., Bejhed J., Johansson H.** MEMS Makes a Difference in Satellite Propulsion // The 4S Symposium. Portoroz, Slovenia, 2012. P. 05—31.
7. **Briand D.** Digital micro-thrusters with simplified architecture and reliable ignition and combustion // PowerMEMS 2008. The International Workshop on Micro and NanoTechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications, Sendai, Japan, November 9—12, 2008. P. 157—160.
8. **Zakar E.** Technology Challenges in Solid Energetic Materials for Micro Propulsion Applications. Adelphi, MD: Army Research Laboratory, 2009.
9. **Ross C.** Micropropulsion for Space — A Survey of MEMS-based Micro Thrusters and their Solid Propellant Technology // Sensors Updates. 2002. V. 10. P. 257—292.
10. **Larangot B., Rossi C., Chaalane A.** et al. Solid Propellant Microrockets — Towards a New Type of Power MEMS // Nanotech'02, 2002. Micropyros final report. P. 1—15.
11. **Mueller J., Marrese C., Polk J.** et al. An Overview of MEMS-based micropropulsion developments at JPL // Acta Astronautica. 2003. V. 52, N. 9—12. P. 881—895.
12. **Chakraborty S., Ataman C., Courtney D. G.** et al. A ToF-MS with a Highly Efficient Electrostatic Ion Guide for Characterization of Ionic Liquid Electrospray Sources // Journal of the American Society for Mass Spectrometry. 2014. V. 25, N. 8. P. 1364—1373.
13. **Morinigo A., Hermida-Quesada J.** Multiphysics Simulation of a Novel Concept of MEMS-based Solid Propellant Thruster for Space Propulsion // Journal of Thermal Sci. 2011. V. 20, N. 6. P. 527—533.
14. **Song W., Shumlak U.** Technical Note // Journal of Propulsion and Power. 2008. V. 24, N. 1. P. 10—14.
15. **Lozano P., Martinez-Sanchez M.** Ionic liquid ion sources: characterization of externally wetted emitters, Journal of Colloid and Interface Science, Feb. 15, 2005. V. 282, N. 2. P. 421—451.
16. **Mueller J.** Thruster Options for Microspacecraft: A Review and Evaluation of State-of-the-Art and Emerging Technologies, Micropropulsion for Small Spacecraft, in Progress in Astronautics and Aeronautics / Edited by Miccisi M. and Ketsdever A., AIAA, 2000, Ch. 3.
17. **Musinski L.**, et al. M. Experimental Results and Modeling Advances in the Study of the nanoparticle Field Extraction Thruster, AIAA Paper 2007—5254, 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cincinnati, OH, USA.
18. **Liu T. M., Drenkow B. D., Musinski L.** et al. Nanoparticle Field Extraction Thruster (nanoFET): Introduction to, Analysis of, and Experimental Results from "No-liquid" Configuration. AIAA Paper 2008-5097, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Hartford, CT, USA.
19. **Bayt R. L.** Analysis, fabrication, and testing of a MEMS-based micropropulsion system. Ph. D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology. 1999. 161 p.
20. **Choueiri E. Y.** Overview of US academic programs in electric propulsion // 35th AIAA joint propulsion conference, June 1999, AIAA 99-2163.
21. **Epstein A. H., Senturia S. D.** Macro power from micro machinery // Science. 1997. V. 276, N. 5316. P. 1211.
22. **Lewis D. H., Janson S. W., Cohen E. K.** et al. Digital micropropulsion // Sens. Actuator, A-Phys. 2000. V. 80. P. 143—154.
23. **Teasdale D., Milanovic V., Chang P.** et al. Microrockets for Smart Dust // Smart Mater. Struct. 2001. V. 10. P. 1145—1155.
24. **Garcia L., Akinwande A., Martinez-Sanchez M.** A Micro-Fabricated Colloid Thruster Array // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Indianapolis, IN, July 7—10. AIAA Paper 2002-3810.
25. **Lozano P., Glass P., Martinez-Sanchez M.** Performance Characteristics of a Linear Ionic Liquid Electrospray Thruster // 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, NJ, USA. IEPC Paper 2005-192.
26. **Garza T., Lozano P., Velasquez-Garcia L.** et al. The characterization of Si wettability and properties of externally wetted microfabricated electrospray thruster arrays // 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, NJ, USA. IEPC Paper 2005-195.
27. **Garza T., Lozano P., Velasquez-Garcia L.** et al. Propellant Spread over Silicon Electrospray Surfaces // 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Sacramento, CA, USA. AIAA Paper 2006-4640.
28. **Velasquez-Garcia L., Martinez-Sanchez M., Akinwande A.** Two Dimensional Microfabricated Colloid Thruster Arrays // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Fort Lauderdale, FL, USA. AIAA Paper 2004-3595.
29. **Scharfe D., Ketsdever A.** A Review of High Thrust, High Delta-V Options for Microsatellite Missions. // 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibition, 2—5 August 2009. AIAA Paper 2009-4824.
30. **Briand D., Pham P. Q., Rossi C.** et al. Miniaturisation of Solid Propellant Thrusters for Space Application, Sensors. Actuators and Microsystems Laboratory (SAMPLAB), Institute of Microtechnology University of Neuchâtel Switzerland; LAAS-CNRS, Toulouse.
31. **Yetter R. A., Yang V., Wu M.** et al. Combustion issues and approaches for chemical microthruster. In: Advancements in Energetic Materials and Chemical Propulsion. Kuo K. and Rivera J. (eds). Begell House, 2007. P. 389—421.
32. **Rossi C., Dumonteui M., Camps T.** et al. Matrix of 10¹⁰ addressed solid propellant microthrusters: review of the technologies // Sensor Actuat. A Phys. 2006. V. 126. P. 241—252.
33. **Ryan J., Stark J., Ataman C., Dandavino S.** et al. Design and fabrication of the thruster heads for the MicroThrust MEMS electrospray propulsion system // IEPC-2013. 33rd International Electric Propulsion Conference, Washington, D. C., USA, October 6—10, 2013. P. 127.
34. **Visee R., de Jong M., Timmerman J.** Miniaturized HV Power Supply (Power and Control System concept) // IEPC-2013. 33rd International Electric Propulsion Conference, The George Washington University, Washington, DC, USA, October 6—10, 2013. P. 258.
35. **Borner A., Levin D. A.** Coupled Molecular Dynamics—Three-Dimensional Poisson Simulations of Ionic Liquid Electro-

spray Thrusters // IEPC-2013. 33rd International Electric Propulsion Conference, The George Washington University, Washington, DC, USA, October 6–10, 2013. P. 453.

36. **Krpoun R.** Micromachined Electro-spray Thrusters for Spacecraft Propulsion. PhD Thesis, EPFL, 2009. 133 p.

37. **Krpoun R., Shea H.** Integrated out-of-plane nanoelectrospray thruster arrays for spacecraft propulsion // J. of Micromechanics and Microengineering. 2009. V. 19. P. 045019–045029.

38. **Ataman C., Dandavino S., Shea H.** et al. Design and fabrication of the thruster heads for the MicroThrust MEMS electro-spray propulsion system // IEPC-2013. Presented at the 33rd International Electric Propulsion Conference, Washington, D. C., USA, October 6–10, 2013. P. 127.

39. **Dandavino S., Ataman C., Shea H.** et al. Microfabrication of Capillary Electro-spray Emitters and ToF Characterization of the Emitted Beam // IEPC-2011. Presented at the 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11–15, 2011. P. 131.

40. **Sanders B., Van Vliet L., Tata Nardini F.** et al. Development of MEMS based Electric Propulsion // Space Propulsion Conference, San Sebastian, Spain, May 3–6, 2010.

41. **Lewis D. H., Janson S. W., Cohen R. B.**, et al. Digital micro-propulsion, Sens. Actuator, A-Phys., 2000, Vol. 80. P. 143–154.

42. **Zhang K. L., Chou S. K., Ang S. S.** Development of a solid propellant micro-thruster with chamber and nozzle etched on a wafer surface // J. Micromech. Microeng. 2004. V. 14. P. 785–792.

43. **Zhang K. L., Chou S. K.** Performance Prediction of a Novel Solid Propellant Microthruster // J. Propulsion and Power. 2006. V. 22, N. 1. P. 56–63.

44. **Zhang K. L., Chou S. K., Ang S. S.** A wireless addressing interface circuitry for microthruster array applications // Aircr. Eng. Aerosp. Technol. 2007. V. 79. P. 628–634.

45. **Zhang K. L., Chou S. K., Ang S. S.** Investigation on the ignition of a MEMS solid propellant microthruster before propellant combustion // J. of Micromech. Microeng. 2007. V. 17. P. 322–332.

46. **Chou S. K., Zhang K. L., Ang S. S.** Development of micro power generators—A review // Applied Energy. 2011. V. 88. P. 1–16.

47. **Zhang K. L., Chou S. K., Ang S. S.** A MEMS-based solid propellant microthruster with Au/Ti igniter // Sensors and Actuators. 2005. A, V. 122. P. 113–123.

48. **Zhang K. L., Chou S. K., Ang S. S.** Performance prediction of a novel solid-propellant microthruster // J. Propul. Power. 2006. V. 22. P. 56–63.

49. **Zhou Z., Xiong J., Ye X., Wang X.** et al. Designing, fabrication, and test of a MEMS colloid thruster // Proceedings of the SPIE, Oct. 17, 2002. V. 4928. P. 148–154.

50. **Xiong J., Zhou Z., Ye X.** et al. A colloid micro-thruster system // Microelectronic Engineering, July 2002. V. 61–63. P. 1031–1037.

51. **Ru C., Ye J.** et al. Design and Fabrication of MEMS-based Solid Propellant Microthrusters Array // Applied Mechanics and Materials. 2014. V. 490–491. P. 1042–1046.

52. **Seo D., Lee J., Kwon S.** The development of the micro-solid propellant thruster array with improved repeatability // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2012. V. 22, N. 9. P. 094004.

53. **Takahashi K.** Contemporary Technology and Application of MEMS Rocket // Proceedings of CANEUS 2006 Conference Micro-Nano-Technologies for Aerospace Applications, Aug. 27 – Sept. 1, 2006, Toulouse, France. P. 11031.

54. **Александров С. Е., Роевков Н. Д., Спешилова А. Б.** и др. Импульсный микродвигатель для систем ориентации сверхмалых космических аппаратов // Материалы конф. МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА (Мир-2011)". 6–8 сентября 2011 года. Санкт-Петербург. URL:// <http://www.mr.rtc.ru/doc/mechatronics/m18.pdf>

55. **Пятыхев Е. Н.** Микросистемы в аэрокосмической технике // Материалы V Международной научно-технической конференции INTERMATIC — 2006. Москва. МИРЭА. URL: <http://www.mems.ru/pdf/MSTinSpace06.pdf>

V. E. Turkov, Chief of the Centre, **S. A. Zhukova**, Chief of the Complex, **D. D. Riskin**, Lead Engineer, e-mail: dr182@mail.ru. Central Research Institute of Chemistry and Mechanics,

P. G. Babayevsky, Professor, **G. M. Reznichenko**, Associate Professor,

MATI — Russian State Technological University named after K. E. Tsiolkovsky

MEMS-Based Micro Propulsion Systems

The review is devoted to the description of world development of the jet microthrusters made by the MEMS technologies. The principles of work of solid propellant and electric colloid microthrusters (MTSP and MTEC), their designing, topological and technological features, and also opportunities and problems of calculations and modeling are considered. Examples of American, European, Chinese, Russian and other MTSP and MTEC developments are given.

Keywords: solid propellant jet microthrusters, electric colloid jet microthrusters, MEMS technologies, MEMS

References

1. **Mission Design Division Staff**, Ames Research Center, Moffett Field, California, Small Spacecraft Technology State of the Art, NASA/TP-2014-216648/REV1, February 2014. P. 1–177.

2. **Meyer M., Johnson L., Palaszewski B.** et al. DRAFT NASA Technology Area Roadmap for In Space Propulsion Technologies. *Technology Area*. 2010. N. 02. TA02-1-22. URL: http://www.nasa.gov/pdf/501329main_TA02-ID_rev3-NRC-wTASR.pdf

3. **Williams E.** ESA Technology Roadmaps. Brussels, 11 December 2013. P. 1–35. URL: <http://www.esa.int>.

4. **De Rooij N. F., Gautsch S., Briand D.** et al. MEMS for Space, Transducers. June 21–25, 2009. P. 17–24. URL: <http://infoscience.epfl.ch/record/142366/files/MEM%20for%20space.pdf>

5. **Sanders B., Van Vliet L., Tata Nardini F.** Development of MEMS Based Electric Propulsion. *ESA Space Propulsion Conference*, San Sebastian, Spain. 2010. P. 8–12.

6. **Gronland T. A., Bejhed J., Johansson H.** MEMS Makes a Difference in Satellite Propulsion. *The 4S Symposium*. Portoroz, Slovenia. 2012. P. 05–31.

7. **Briand D.** Digital micro-thrusters with simplified architecture and reliable ignition and combustion. *PowerMEMS 2008. The International Workshop on Micro and NanoTechnology for*

Power Generation and Energy Conversion Applications, Sendai, Japan, November 9–12. 2008. P. 157–160.

8. **Zakar E.** *Technology Challenges in Solid Energetic Materials for Micro Propulsion Applications*. Adelphi, MD: Army Research Laboratory, 2009.

9. **Ross C.** Micropropulsion for Space. A Survey of MEMS-based Micro Thrusters and their Solid Propellant Technology. *Sensors Updates*, 2002. V. 10. P. 257–292.

10. **Larangot B., Rossi C., Chaalane A.** et al. Solid Propellant Microrockets — Towards a New Type of Power MEMS. *Nanotech '02*, 2002. Micropyros final report. P. 1–15.

11. **Mueller J., Marrese C., Polk J.** et al. An Overview of MEMS-based micropropulsion developments at JPL. *Acta Astronautica*, May–June 2003. V. 52, N. 9–12. P. 881–895.

12. **Chakraborty S., Ataman C., Courtney D. G.** et al. A ToF-MS with a Highly Efficient Electrostatic Ion Guide for Characterization of Ionic Liquid Electro-spray Sources. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*. 2014. V. 25, N. 8. P. 1364–1373.

13. **Morinigo A., Hermida-Quesada J.** Multiphysics Simulation of a Novel Concept of MEMS-based Solid Propellant Thruster for Space Propulsion. *Journal of Thermal Sci.* 2011. V. 20, N. 6. P. 527–533.

14. Song W., Shumlak U. Technical Note. *Journal of Propulsion and Power*. February 2008, V. 24, N. 1. P. 10–14.
15. Lozano P., Martinez-Sanchez M. Ionic liquid ion sources: characterization of externally wetted emitters. *Journal of Colloid and Interface Science*. Feb. 15, 2005. V. 282, N. 2. P. 421–451.
16. Mueller J. Thruster Options for Microspacecraft: A Review and Evaluation of State-of-the-Art and Emerging Technologies. *Micropropulsion for Small Spacecraft, in Progress in Astronautics and Aeronautics*. Edited by Micci, M. and Ketsdever A., AIAA, 2000, Ch. 3.
17. Musinski L., Liu T., Brian G. et. al. M. Experimental Rej3ultsjndJ4ojieling Advances in the Study of the nanoparticle Field Extraction Thruster. 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cincinnati, OH, USA, AIAA Paper 2007-5254.
18. Liu T. M., Drenkow B. D., Musinski L. et. al. Nanoparticle Field Extraction Thruster (nanoFET): Introduction to, Analysis of, and Experimental Results from "No-liquid" Configuration. 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Hartford, CT, USA. AIAA Paper 2008-5097.
19. Bayt R. L. Analysis, fabrication, and testing of a MEMS-based micropropulsion system. Ph. D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology. 1999. 161 p.
20. Choueiri E. Y. Overview of US academic programs in electric propulsion. 35th AIAA joint propulsion conference, June 1999, AIAA 99-2163.
21. Epstein A. H., Senturia S. D. Macro power from micro machinery. *Science*. 1997. V. 276, N. 5316. P. 1211.
22. Lewis D. H., Janson S. W., Cohen E. K. et al. Digital micropropulsion. *Sens. Actuator, A-Phys*. 2000. V. 80. P. 143–154.
23. Teasdale D., Milanovic V., Chang P. et al. Microrockets for Smart Dust. *Smart Mater. Struct.*, 2001. V. 10. P. 1145–1155.
24. Garcia L., Akinwande A., Martinez-Sanchez M. A Micro-Fabricated Colloid Thruster Array. 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Indianapolis, IN, July 7–10. AIAA Paper 2000-3810.
25. Lozano P., Glass P., Martinez-Sanchez M. Performance Characteristics of a Linear Ionic Liquid Electrospray Thruster. 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, NJ, USA. IEPC Paper 2005-192.
26. Garza T., Lozano P., Velasquez-Garcia L. et al. The characterization of Si wettability and properties of externally wetted microfabricated electrospray thruster arrays. 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, NJ, USA. IEPC Paper 2005-195.
27. Garza T., Lozano P., Velasquez-Garcia L. et al. Propellant Spread over Silicon Electrospray Surfaces. 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Sacramento, CA, USA. AIAA Paper 2006-4640.
28. Velasquez-Garcia L., Martinez-Sanchez M., Akinwande A. Two Dimensional Microfabricated Colloid Thruster Arrays. 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Fort Lauderdale, FL, USA. AIAA Paper 2004-3595.
29. Scharfe D., Ketsdever A. A Review of High Thrust, High Delta-V Options for Microsatellite Missions. 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibition, 2–5 August 2009. AIAA Paper 2009-4824.
30. Briand D., Pham P. Q., Rossi C. et al. Miniaturisation of Solid Propellant Thrusters for Space Application. *Sensors, Actuators and Microsystems Laboratory (SAMLAB)*, Institute of Microtechnology University of Neuchâtel Switzerland; LAAS-CNRS, Toulouse.
31. Yetter R. A., Yang V., Wu M., et al. Combustion issues and approaches for chemical microthruster. In: *Advancements in Energetic Materials and Chemical Propulsion*. Kuo K. and Rivera J. (eds). Begell House, 2007. P. 389–421.
32. Rossi C., Dumonteui M., Camps T. et al. Matrix of 10'10 addressed solid propellant microthrusters: review of the technologies. *Sensor Actuat. A Phys*. 2006. V. 126. P. 241–252.
33. Ryan J., Stark J., Ataman C., Dandavino S. et. al. Design and fabrication of the thruster heads for the MicroThrust MEMS electrospray propulsion system. IEPC-2013. 33rd International Electric Propulsion Conference, Washington, D. C., USA, October 6–10, 2013. P. 127.
34. Vissee R., de Jong M., Timmerman J. Miniaturized HV Power Supply (Power and Control System concept). IEPC-2013. 33rd International Electric Propulsion Conference. The George Washington University, Washington, DC, USA, October 6–10, 2013. P. 258.
35. Borner A., Levin D. A. Coupled Molecular Dynamics — Three-Dimensional Poisson Simulations of Ionic Liquid Electrospray Thrusters. IEPC-2013. 33rd International Electric Propulsion Conference, The George Washington University, Washington, D. C., USA, October 6–10, 2013. P. 453.
36. Krpoun R. Micromachined Electrospray Thrusters for Spacecraft Propulsion. *PhD Thesis, EPFL*, 2009. 133 p.
37. Krpoun R., Shea H. Integrated out-of-plane nanoelectrospray thruster arrays for spacecraft propulsion. *J. of Micromechanics and Microengineering*. 2009. V. 19. P. 045019–045029.
38. Ataman C., Dandavino S., Shea H. et al. Design and fabrication of the thruster heads for the MicroThrust MEMS electrospray propulsion system. IEPC-2013. Presented at the 33rd International Electric Propulsion Conference, Washington, DC, USA, October 6–10, 2013. P. 127.
39. Dandavino S., Ataman C., Shea H. et al. Microfabrication of Capillary Electrospray Emitters and ToF Characterization of the Emitted Beam. IEPC — 2011. Presented at the 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11–15, 2011. P. 131.
40. Sanders B., Van Vliet L., Tata Nardini F. et al. Development of MEMS based Electric Propulsion. *Space Propulsion Conference*, San Sebastian, Spain, May 3–6, 2010.
41. Lewis D. H., Janson S. W., Cohen R. B. et al. Digital micropropulsion. *Sens. Actuator, A-Phys.*, 2000. V. 80. P. 143–154.
42. Zhang K. L., Chou S. K., Ang S. S. Development of a solid propellant micro-thruster with chamber and nozzle etched on a wafer surface. *J. Micromech. Microeng.* 2004. V. 14. P. 785–792.
43. Zhang K. L., Chou S. K. Performance Prediction of a Novel Solid Propellant Microthruster. *J. Propulsion and Power*. 2006. V. 22, N. 1. P. 56–63.
44. Zhang K. L., Chou S. K., Ang S. S. A wireless addressing interface circuitry for microthruster array applications. *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.* 2007. V. 79. P. 628–634.
45. Zhang K. L., Chou S. K., Ang S. S. Investigation on the ignition of a MEMS solid propellant microthruster before propellant combustion. *J. of Micromech. Microeng.* 2007. V. 17. P. 322–332.
46. Chou S. K., Zhang K. L., Ang S. S. Development of micro power generators. — A review. *Applied Energy*. 2011. V. 88. P. 1–16.
47. Zhang K. L., Chou S. K., Ang S. S. A MEMS-based solid propellant microthruster with Au/Ti igniter. *Sensors and Actuator*. 2005. A, V. 122. P. 113–123.
48. Zhang K. L., Chou S. K., Ang S. S. Performance prediction of a novel solid-propellant microthruster. *J. Propul. Power*. 2006. V. 22. P. 56–63.
49. Zhou Z., Xiong J., Ye X., Wang X. et al. Designing, fabrication, and test of a MEMS colloid thruster. *Proceedings of the SPIE*, Oct. 17, 2002. V. 4928. P. 148–154.
50. Xiong J., Zhou Z., Ye X. et al. A colloid micro-thruster system. *Microelectronic Engineering*, July 2002, Vol. 61–62. P. 1031–1037.
51. Ru C., Ye J. et al. Design and Fabrication of MEMS-based Solid Propellant Micrithrusters Array. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. V. 490–491. P. 1042–1046.
52. Seo D., Lee J., Kwon S. The development of the micro-solid propellant thruster array with improved repeatability. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2012. V. 22, N. 9. P. 094004.
53. Takahashi K. Contemporary Technology and Application of MEMS Rocket. *Proceedings of CANEUS 2006 Conference Micro-Nano-Technologies for Aerospace Applications*, Aug. 27–Sept. 1, 2006, Toulouse, France. P. 11031.
54. Aleksandrov S. E., Roenkov N. D., Speshilova A. B. i dr. Impul'snyj mikrodvigatel' dlja sistem orientacii sverhmal'nyh kosmicheskikh apparatov. *Materialy konf. "MEHATRONIKA I ROBOTOTEHNIKA (MiR-2011)"*. 6–8 sentjabrja 2011 goda. Sankt-Peterburg. URL: <http://www.mr rtc.ru/doc/mechatronics/m18.pdf>
55. Pjatyshchev E. N. Mikrosistemy v ajerokosmicheskoy tehnike. *Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii INTERMATIC — 2006*. Moskva: MIRJeA. URL: <http://www.mems.ru/pdf/MSTinSpace06.pdf>

М. О. Макеев, мл. науч. сотр., инженер 1 кат., e-mail: mc.stiv@gmail.com,
Ю. А. Иванов, д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: y-a-ivanov@mail.ru,
С. А. Мешков, канд. техн. наук, e-mail: meschkow@bmstu.ru, **В. Ю. Синякин**, аспирант
 Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕГРАДАЦИИ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ НА БАЗЕ AlAs/GaAs-НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР

Поступила в редакцию 14.07.2014

Проведены исследования термической деградации резонансно-туннельных диодов с использованием метода ускоренного старения. Определены активационные параметры диффузии (энергия активации и предэкспоненциальный множитель) Al и Si в резонансно-туннельной структуре и приконтактных областях диодов, а также зависимость контактного сопротивления AuGeNi омических контактов от времени и температуры.

Ключевые слова: AlAs/GaAs-гетероструктура, резонансно-туннельный диод, нелинейные преобразователи радиосигналов, деградационные явления, термическое воздействие, коэффициент диффузии, контактное сопротивление, ИК спектральная эллипсометрия

Введение

Одним из путей повышения качества радиоэлектронных систем является использование полупроводниковых приборов, функционирующих на основе квантоворазмерных эффектов токопереноса. К таким приборам относятся резонансно-туннельные диоды (РТД) на базе многослойных наноразмерных резонансно-туннельных AlAs/GaAs-гетероструктур с поперечным токопереносом. Малое время туннелирования электронов обеспечивает предельно высокое быстродействие диода (частота до 1 ТГц) и подавление дробовых шумов [1].

Изменяя параметры слоев гетероструктуры (толщину, элементный состав), можно варьировать форму вольт-амперной характеристики (ВАХ). Такие свойства РТД позволяют создавать на его базе различные нелинейные преобразователи радиосигналов: смесители, выпрямители, умножители и генераторы для диапазонов СВЧ и КВЧ, функциональные характеристики которых могут быть улучшены за счет оптимизации формы ВАХ нелинейного элемента [2–5]. Если исследованиям свойств самих РТД и проблемам их радиотехнических применений посвящена обширная библиография, то надежность РТД изучена слабо.

РТД содержит резонансно-туннельную структуру (РТС) (набор слоев AlAs/GaAs), приконтактные области (слои Si-легированного GaAs) и омические контакты. Форма ВАХ РТД определяется структурой РТС, сопротивлением приконтактной области полупроводника R_{n-n+} , сопротивлением R_C омического контакта. Исходя из этого исследование термической деградации РТД ведется в трех направлениях: исследование межслойной диффузии Al в РТС, исследование диффузии Si в прикон-

тактных областях и исследование деградационных явлений в омических контактах в процессе изготовления и эксплуатации РТД.

Методики экспериментов

Для решения поставленной задачи авторами были разработаны две методики:

- методика определения коэффициентов диффузии Al и Si в наноразмерных резонансно-туннельных AlAs/GaAs-структурах и приконтактных областях на основе ИК спектральной эллипсометрии;
- методика определения зависимости контактного сопротивления R_C омических контактов от времени и температуры.

Структурные схемы данных методик показаны на рис. 1.

Объектами экспериментальных исследований служили наноразмерная резонансно-туннельная AlAs/GaAs-гетероструктура с приконтактными областями и 32 РТД (8 чипов) с одинаковой структурой (рис. 2).

Для экспериментального исследования использовали метод ускоренного старения путем термического воздействия на образец. Температура воздействия была выбрана 300 °С. Предполагается [6], что при данной температуре действуют те же механизмы отказов, что и при нормальных условиях эксплуатации.

Термическое воздействие на AlAs/GaAs-гетероструктуру с приконтактными областями проводилось в течение 4, 6, 8 и 10 ч (суммарное время термического воздействия 28 ч) в воздушной среде в электропечи сопротивления СНОЛ 6/11, предназначенной для термообработки изделий при температурах от 50 до 1150 °С с точностью ± 5 °С.

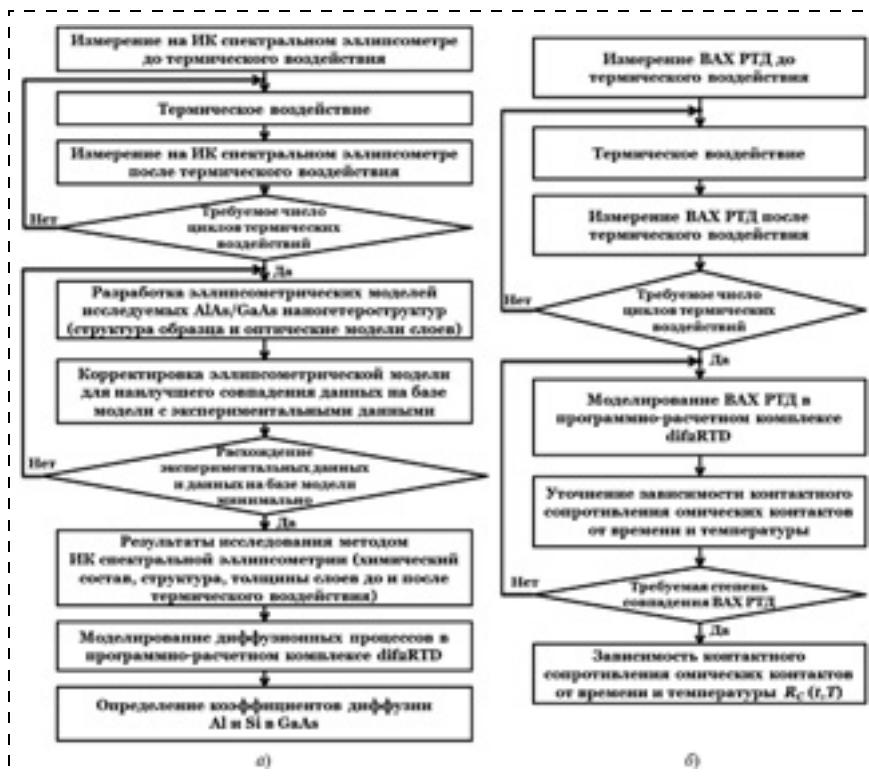


Рис. 1. Структурная схема методик определения коэффициентов диффузии Al и Si в наноразмерных резонансно-туннельных AlAs/GaAs-гетероструктурах на основе ИК спектральной эллипсометрии (а) и определения зависимости контактного сопротивления R_C омических контактов от времени и температуры (б)

Термическое воздействие на РТД также проводилось в течение 1, 2, 5, 9 и 10 ч (суммарное время воздействия 27 ч) на лабораторном воздушном тер-

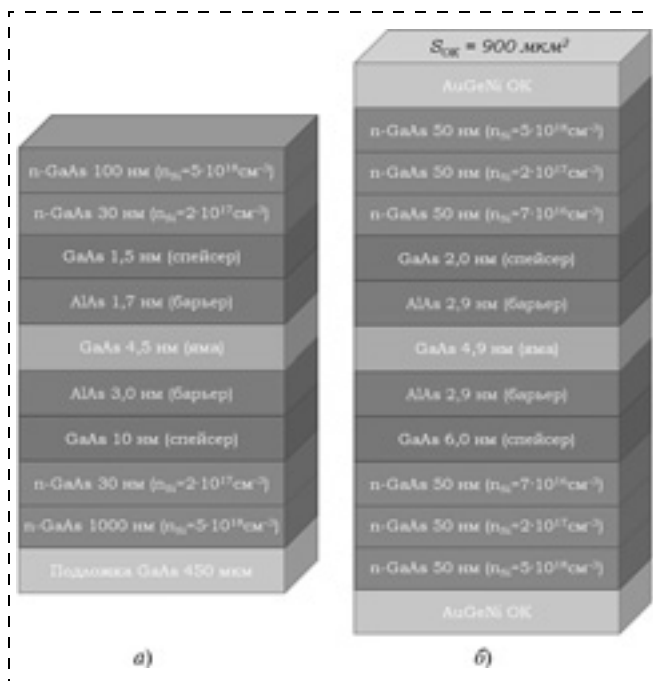


Рис. 2. Структура исследуемых образцов: а — AlAs/GaAs-наногетероструктура с приконтактными областями; б — структура резонансно-туннельных диодов

мостате, который позволяет варьировать температуру в диапазоне от 40 до 300 °С с точностью ± 5 °С.

Исследование AlAs/GaAs-гетероструктуры с приконтактными областями проводили на ИК спектроэллипсометре IR-VASE компании J. A. Woollam Co., Inc. Эллипсометрические исследования состоят из следующих основных этапов:

- измерение спектров эллипсометрических параметров Ψ и Δ ($\text{tg}\Psi$ показывает отношение амплитуд коэффициентов отражения для p - и s -волн, а параметр Δ равен разности между фазовыми скачками этих волн при отражении);
- создание эллипсометрической модели (оптические константы и толщины слоев);
- варьирование параметров модели для получения наилучшего совпадения экспериментальных и сгенерированных на базе этой модели данных;
- анализ и интерпретация полученных данных.

Исследование гетероструктуры на ИК спектроэллипсометре IR-VASE проводили в диапазоне волновых чисел от 300 до 3000 см^{-1} при спектральном разрешении 4 см^{-1} и углах падения излучения на образец 60 и 70°. Построение эллипсометрических моделей выполнялось в программной среде WVASE32 [7], с помощью которой проводят обработку измерений эллипсометра IR-VASE.

Измерения ВАХ РТД до и после термических воздействий проводили на микрозондовом стенде, состоящем из микрозондового устройства, источника питания Agilent E3641A и персонального компьютера. Данный стенд позволяет измерять ВАХ диодов в диапазоне напряжений от 0 до 36 В (точность $\Delta U = \pm 1$ мВ) и токов от 0 до 1 А (точность $\Delta I = \pm 10$ мкА).

Определение коэффициентов диффузии Al и Si в наноразмерной AlAs/GaAs резонансно-туннельной гетероструктуре

Для определения коэффициентов диффузии Al и Si в резонансно-туннельной AlAs/GaAs-гетероструктуре с приконтактными областями было измерено с помощью ИК спектральной эллипсометрии диффузионное размытие слоев структуры, вызванное термическим воздействием.

По литературным данным [8–16] коэффициенты диффузии Al и Si в GaAs сильно варьируются

в зависимости от условий изготовления гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Это связано с тем, что дефектность выращиваемых гетероструктур зависит от большого числа технологических факторов, таких как температура подложки (600...650 °С) при проведении МЛЭ, давление в камере, температура и время проведения отжига, дефектность исходной подложки и многое другое.

Кроме того, коэффициенты диффузии Si и Al сильно зависят от концентрации легирующей примеси, в нашем случае это кремний. Исходя из этого диффузионным размытием при температуре 300 °С в нелегированных и слабелегированных областях можно пренебречь (оно будет в пределах погрешности измерения). Поэтому измерение скорости диффузионных процессов Si проводилось нами для областей сильнолегированного *n*-GaAs со степенью легирования кремнием более $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Были разработаны эллипсометрические модели исследуемой AlAs/GaAs-гетероструктуры с приконтактными областями до и после 4, 10, 18 и 28 ч термического воздействия (см. таблицу). Эти модели имеют одинаковую структуру. Для оценки глубины диффузии Si в эллипсометрическую модель гетероструктуры были введены градиентные слои. Экспериментальные и вычисленные на базе эллипсометрических моделей спектры параметров Ψ и Δ AlAs/GaAs-гетероструктуры до и после 28 ч термических воздействий представлены на рис. 3.

Оптическая модель (показатели преломления *n* и поглощения *k*) эпитаксиального GaAs была по-

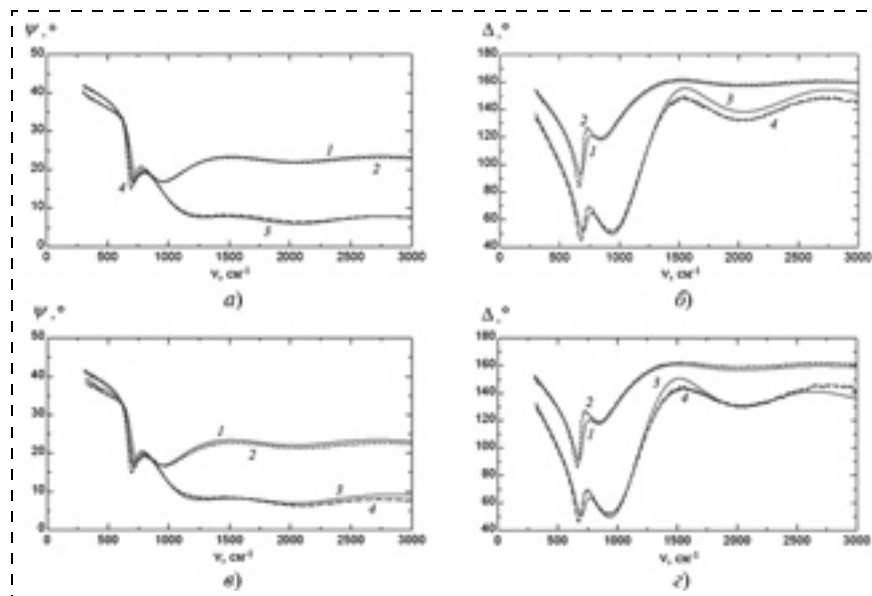


Рис. 3. Спектры эллипсометрических параметров Ψ (а, в) и Δ (б, г) наноразмерной AlAs/GaAs-гетероструктуры с приконтактными областями до (а, б) и после 28 ч (в, г) термического воздействия:

1 — данные, вычисленные на базе модели, при угле падения 60°; 2 — экспериментальные данные при угле падения 60°; 3 — данные, вычисленные на базе модели, при угле падения 70°; 4 — экспериментальные данные при угле падения 70°

строена с помощью модуля General Oscillator Layer программной среды WVASE32 на основе трех осцилляторов Лоренца (рис. 4, а). Центральные волновые числа осцилляторов приняты равными 268, 444 и 516 см^{-1} . Осциллятор с волновым числом 268 см^{-1} соответствует поперечным оптическим колебаниям фононов (ТО) (268 см^{-1}) и продольным оптическим колебаниям фононов (ЛО) (малая добавка на 292 см^{-1}). Центральные волновые числа осцилляторов на 444 и 516 см^{-1} соответствуют гармоникам колебаний фононов — сумме поперечных оптических колебаний и продольных акустических (ТО + LA) и сумме двух продольных оптических колебаний (ТО + ТО) соответственно [17].

Оптические константы Si-легированного GaAs представляют собой константы исходного GaAs с

Эллипсометрические модели AlAs/GaAs-гетероструктуры с приконтактными областями при различных длительностях термического воздействия

Описание слоя	Толщины слоев после заданного времени термических испытаний, нм				
	0 ч	4 ч	10 ч	18 ч	28 ч
Верхний шероховатый слой	24,9 ± 2,0	23,3 ± 2,1	24,9 ± 2,2	25,0 ± 2,0	15,9 ± 2,1
<i>n</i> -GaAs сильнолегированный Si ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	100,3 ± 1,7	98,6 ± 1,6	97,2 ± 1,8	96,3 ± 1,7	103,4 ± 1,6
Градиентный слой	0	2,7 ± 1,5	4,4 ± 1,5	5,4 ± 1,6	6,7 ± 1,5
<i>n</i> -GaAs легированный Si ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$)	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Арсенид галлия GaAs (спейсер)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Арсенид алюминия AlAs (барьер)	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Арсенид галлия GaAs (яма)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Арсенид алюминия AlAs (барьер)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Арсенид галлия GaAs (спейсер)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
<i>n</i> -GaAs легированный Si ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$)	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Градиентный слой	0	2,9 ± 1,6	4,5 ± 1,8	5,6 ± 1,9	6,9 ± 1,8
<i>n</i> -GaAs сильнолегированный Si ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	1005,0 ± 3,0	1003,6 ± 3,0	992,9 ± 3,6	990,4 ± 3,5	991,2 ± 3,6
Градиентный слой	0	3,2 ± 1,8	4,7 ± 1,8	5,8 ± 2,0	7,1 ± 1,9
Подложка GaAs	0,45 мм	0,45 мм	0,45 мм	0,45 мм	0,45 мм
Нижний шероховатый слой	90,5 ± 10,0	89,2 ± 10,0	88,8 ± 10,0	88,6 ± 10,0	74,9 ± 10,0

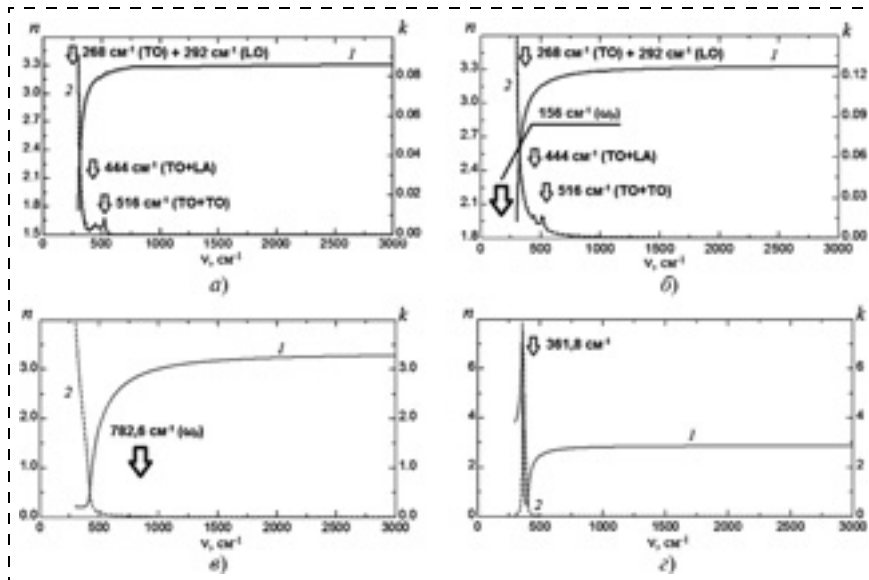


Рис. 4. Оптические константы GaAs (а), легированного ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) *n*-GaAs (б), сильнолегированного ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) *n*-GaAs (в) и арсенида алюминия AlAs (г):

1 — показатель преломления; 2 — показатель поглощения; ТО — поперечные оптические колебания фононов; LO — продольные оптические колебания фононов; TO + LA — сумма частот продольных колебаний и частот, соответствующих поглощению решетки; TO + TO — сумма двух продольных колебаний

дополнительной полосой поглощения, обусловленной наличием свободных электронов вследствие легирования. Частота этой полосы определяется значением плазменной частоты ω_p [18]:

$$\omega_p = \frac{Ne^2}{\epsilon\epsilon_0 m^*}, \quad (2)$$

где e — заряд электрона; N — концентрация свободных носителей заряда; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды (для GaAs $\epsilon = 10,9$); ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума; m^* — эффективная масса носителей заряда (для GaAs эффективная масса электрона $m^* = 0,067m_0$, где m_0 — масса электрона).

Для уровней легирования N , равных $2 \cdot 10^{17}$ и $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, плазменная частота оказывается равной 156,5 и $782,6 \text{ см}^{-1}$ соответственно. Исходя из этого, были определены оптические константы легированного *n*-GaAs (степень легирования Si — $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) и сильнолегированного (степень легирования Si — $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) (рис. 4, б и 4, в).

Оптические константы арсенида алюминия AlAs (рис. 4, г) были построены на основе осциллятора Лоренца с центральным волновым числом, равным $361,8 \text{ см}^{-1}$ [19].

Для учета шероховатости был использован метод эквивалентной пленки [20–22] с процентным содержанием GaAs и воздуха 50 на 50 %, а показатели преломления и поглощения моделируемых шероховатых слоев рассчитывались по формуле Бруггемана [7]. На поверхности GaAs также есть тонкий слой естественного оксида, состоящий из

оксидов галлия Ga_2O_3 и мышьяка As_2O_3 толщиной порядка 2 нм. Оксидный слой практически не влияет на результаты оптических измерений в инфракрасной области, так как оказывает влияние только при энергии фотонов, соизмеримых с шириной запрещенной зоны для оксидов (порядка 5 эВ) [17]. По этой причине в эллипсометрическую модель он не включался.

В результате были определены толщины градиентных слоев (см. таблицу), возникших в процессе диффузионного ухода Si из высоколегированных слоев GaAs ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Эти данные были использованы при определении коэффициента диффузии кремния в арсениде галлия, при этом за основу было взято соотношение из работы [23]:

$$D_{\text{Al, Si}} = 0,22 \exp\left(-\frac{3,5 \text{ эВ}}{k_B T}\right) \left(\frac{n_{\text{Si}}}{n_i}\right)^3, \quad (3)$$

где k_B — постоянная Больцмана ($k_B = 8,617 \times 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{K}^{-1}$); T — температура, K; n_{Si} — концентрация легирующей примеси (Si), см^{-3} ; n_i — концентрация собственных носителей заряда, см^{-3} .

В итоге диффузионного размытия в исследованной резонансно-туннельной структуре (диффузия Al) и в приконтактных областях со степенью легирования менее $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (диффузия Si) при температуре 300°C замечено не было. Обнаружено только диффузионное размытие Si в областях сильнолегированного *n*-GaAs.

Определение зависимости контактного сопротивления омических контактов от времени и температуры

В работах [24, 25] показано, что диффузионное размытие в резонансно-туннельной структуре влияет на форму ВАХ РТД. Но в нашем случае моделирование диффузионных процессов в разработанном авторами программно-расчетном комплексе dif2RTD [26] свидетельствует о том, что при температуре 300°C диффузионное размытие в исследуемой резонансно-туннельной структуре пренебрежимо мало и не приводит к заметному изменению формы ВАХ РТД. Диффузионное размытие Si в приконтактных областях также не оказывает существенного влияния на R_C и ВАХ РТД. Для объяснения обнаруженного нами изменения ВАХ РТД можно предположить, что в результате термического воздействия деградации подвергаются

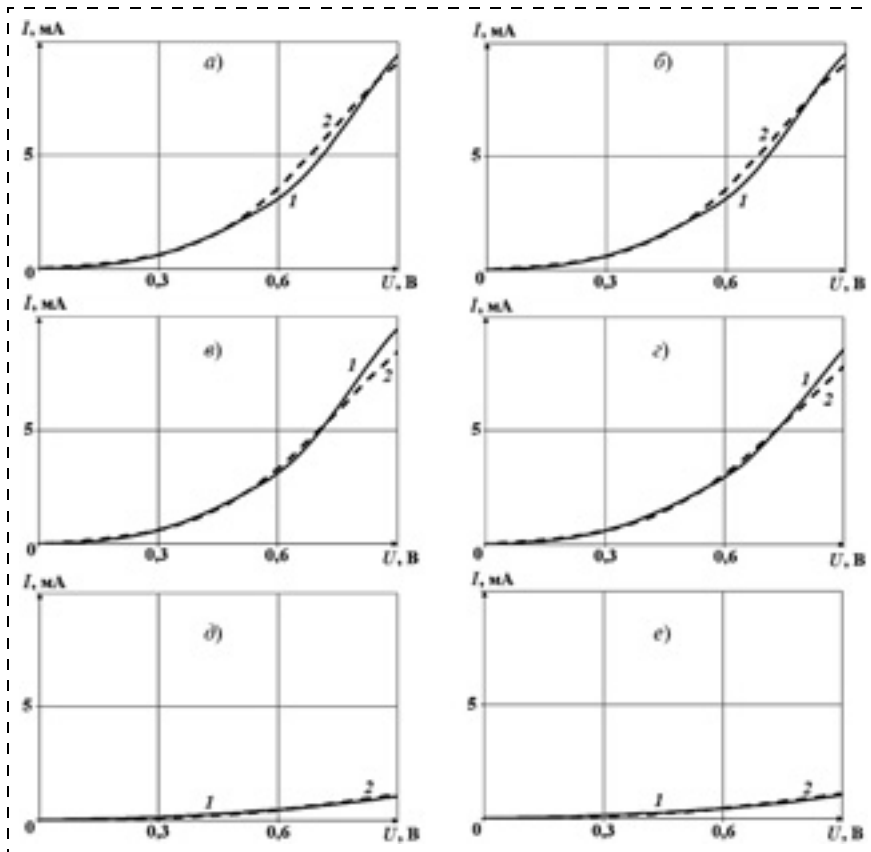


Рис. 5. Экспериментальные (1) и смоделированные (2) ВАХ РТД до (а), после 1 (б), 3 (в), 8 (г), 17 (д) и 28 (е) ч термического воздействия

омические AuGeNi-контакты, что приводит к увеличению их контактного сопротивления R_C .

Зависимость контактного сопротивления R_C омических AuGeNi-контактов от времени и температуры может быть описана следующим образом [27]:

$$R_C = R_{C0} + \gamma \exp\left(\frac{-E_a}{2kT}\right) \sqrt{t}, \quad (4)$$

где R_{C0} — контактное сопротивление в начальный момент времени (сразу после изготовления), Ом (для площади контакта $S_C = 25 \text{ мкм}^2$ при значении удельного контактного сопротивления $10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ [28, 29] R_{C0} оказывается равным 4 Ом); γ — коэффициент пропорциональности между контактным сопротивлением R_C (Ом), температурой T (К), энергией активации E_a (эВ) и временем t (с); k — постоянная Больцмана ($k = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$).

Энергия активации E_a деградиционных явлений омических AuGeNi-контактов равна 1 эВ [30, 31].

В результате экспериментальных исследований в соответствии с методикой определения зависимости контактного сопротивления омических контактов от времени и температуры были получены ВАХ 32 РТД до и после 1, 3, 8, 17 и 27 ч термического воздействия и проведена их статистическая обработка. Разброс ВАХ находится в пределах по-

грешности измерений, поэтому на рис. 5 (кривая 1) приведены усредненные по всей партии ВАХ.

На том же рисунке (кривая 2) представлены смоделированные в программно-расчетном комплексе dif2RTD вольт-амперные характеристики РТД. Видно, что экспериментальные и смоделированные ВАХ РТД хорошо согласуются между собой. В итоге был определен коэффициент γ , отражающий скорость диффузионной деградации омических контактов; он оказался равен $25 \text{ Ом} \cdot \text{с}^{-0,5}$. Таким образом, функциональную зависимость контактного сопротивления омических AuGeNi-контактов от времени и температуры можно представить следующим образом:

$$R_C = 4 + 25 \exp\left(\frac{-1}{2kT}\right) \sqrt{t}. \quad (5)$$

Заключение

Определены численные характеристики основных деградиционных процессов, происходящих в структуре РТД в результате тер-

мического воздействия:

- активационные параметры диффузии (энергия активации диффузии и предэкспоненциальный множитель Al и Si в резонансно-туннельной структуре и приконтактных областях;
- зависимость контактного сопротивления R_C омических AuGeNi-контактов от времени и температуры.

В исследованных РТД на основе AlAs/GaAs-наногетероструктур при температуре воздействия 300°C изменение ВАХ вызвано преимущественно деградацией омических контактов. Деградации резонансно-туннельной структуры замечено не было. Но при более высокой степени дефектности полупроводниковой гетероструктуры скорость диффузии Al и Si может быть значительно выше, чем в исследуемой структуре. Это приведет к размытию профиля РТС и, соответственно, дополнительному изменению формы ВАХ РТД и эксплуатационных характеристик приборов на их основе.

Полученные в настоящей работе численные характеристики деградиционных процессов могут быть использованы для прогнозирования надежности РТД и радиотехнических устройств их основе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Задание № 16.1116.2014/К).

Список литературы

1. Alkeev N. V., Averin S. V., Dorofeev A. A., Gladysheva N. B., Torgashin M. Yu. GaAs/AlAs resonant-tunneling diode for subharmonic mixers // Russian Microelectronics. 2010. V. 39, N. 5. P. 331–339.
2. Вьюгинов В. Н., Гудков А. Г., Добров В. А., Мешков С. А., Попов В. В. Гетероструктурная СВЧ-электроника в России // Электромагнитные волны и электронные системы. 2012. № 1. С. 4–9.
3. Ivanov Y. A., Meshkov S. A., Fedorenko I. A., Fedorkova N. V., Shashurin V. D. Subharmonic mixer with improved intermodulation characteristics based on a resonant tunnel diode // Journal of Communications Technology and Electronics. 2010. V. 55, N. 8. P. 982–988.
4. Иванов Ю. А., Мешков С. А., Федоркова Н. В., Федоренко И. А. Улучшение параметров приемника СВЧ-диапазона применением резонансно-туннельного нанодиода в преобразователе частоты // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, Сер. Приборостроение. 2010. Спец. выпуск "Наноинженерия". С. 128–137.
5. Иванов Ю. А., Мешков С. А., Сиякин В. Ю., Федоренко И. А., Федоркова Н. В., Федоров И. Б., Шашурин В. Д. Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов // Наноинженерия. 2011. № 1. С. 34–43.
6. Горлов М. И., Строгонов А. В. Геронтология интегральных схем: прогнозирование долговечности ИС // Петербургский журнал электроники. 1996. № 4. С. 35–41.
7. IR-VASE User's Manual. J. A. Woollam Co., Inc., 2006.
8. Yu S., Gösele U. M., Tan T. Y. A model of Si Diffusion in GaAs based on the effect of the Fermi level // J. Appl. Phys. 1989. V. 66, N. 7. P. 2952–2961.
9. Chen C.-H., Gösele U. M., Tan T. Y. Dopant diffusion and segregation in semiconductor heterostructures: Part III. Diffusion of Si into GaAs // Appl. Phys. A. 1999. V. 69. P. 313–321.
10. You H.-M., Gösele U. M., and Tan T. Y. A study of Si out-diffusion from predoped GaAs. // J. Appl. Phys. 1993. V. 73, N. 11. P. 7207–7216.
11. Pavesi L., Nguyen Hong Ky, Ganiere J. D., Reinhart F. K., Baba-Ali N., Harrison I., Tuck B., Henini M. Role of point defects in the silicon diffusion in GaAs and $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ and in the related superlattice disordering // J. Appl. Phys. 1992. V. 71, N. 5. P. 2225–2237.
12. Bracht H., Haller E. E., Eberl K., Cardona M. Self- and interdiffusion in $\text{AlGa}_{1-x}\text{As}$ /GaAs isotope heterostructures // Appl Phys. Lett. 1999. V. 74, N. 1. P. 49–51.
13. Wee S. F., Chai M. K., Homewood K. P., Gillin W. P. The activation energy for GaAs/AlGaAs interdiffusion // J. Appl. Phys. 1997. V. 82, N. 10. P. 4842–4846.
14. Olmsted B. L., Houde-Walter S. N. Al-Ga interdiffusion through group III-vacancy second nearest-neighbor hopping // Appl Phys. Lett. 1993. V. 63, N. 4. P. 530–532.
15. Wang L., Hsu L., Haller E. E., Erickson J. W., Fischer A., Eberl K., and Cardona M. Gaself-diffusion in GaAs isotope heterostructures // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. P. 2342–2345.
16. Ono H., Ikarashi N., Baba T. Al diffusion into GaAs monatomic AlAs layers investigated by localized vibrational modes // Appl Phys. Lett. 1995. V. 66, N. 5. P. 601–603.
17. Palik E. D. Handbook of optical constants of solids. V. 1. N. Y.: Academic Press, 1985. 785 p.
18. Fox M. Optical properties of solids. Oxford University Press, 2001. 318 p.
19. Palik E. D. Handbook of optical constants of solids. V. 2. N. Y.: Academic Press, 1991. 1096 p.
20. Святешева С. Н. Эллипсометрия шероховатых поверхностей. Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07: Новосибирск, 2009.
21. Aspnes D. E. Optical properties of thin films // Thin Solid Films. 1981. V. 89, N. 3. P. 249–262.
22. Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Meshkov S. A., Gil'man A. B., and Yablokov M. Yu. Application of IR ellipsometry to determination of the film thickness of a polytetrafluoroethylene sample modified in direct-current discharge // High Energy Chemistry, 2011. V. 45, N. 6. P. 536–538.
23. Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Meshkov S. A. Исследование деградационных явлений в наноразмерных AlAs/GaAs гетероструктурах методом ИК-спектроскопии // Наноинженерия. 2011. № 4. С. 44–48.
24. Агасиева С. В., Шашурин В. Д. Влияние процесса деградации нанодиода на качество нелинейного преобразователя сигналов // Наноинженерия. 2011. № 3. С. 36–40.
25. Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Meshkov S. A., Шашурин В. Д. К вопросу о повышении надежности смесительных AlAs/GaAs резонансно-туннельных диодов конструктивно-технологическими методами // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2013. № 11. С. 229–243.
26. Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Литвак Ю. Н., Мешков С. А., Мигаль Д. Э., Назаров В. В. Моделирование кинетики вольт-амперных характеристик AlAs/GaAs РТД в результате диффузионных процессов в его структуре // Наноинженерия. 2014. № 1. С. 24–29.
27. Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Meshkov S. A., Назаров В. В. Исследование термической деградации AuGeNi омических контактов резонансно-туннельных диодов на базе наноразмерных AlAs/GaAs гетероструктур // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2012. № 09. С. 14.
28. Murakami M. Development of refractory ohmic contact materials for gallium arsenide compound semiconductors // Science and Technology of Advanced Materials. 2002. V. 3. P. 1–27.
29. Blank T. V., Goldberg Yu. A. The current flow mechanism in metal semiconductor ohmic contacts // Semiconductors. 2007. V. 41, N. 11. P. 1281–1308.
30. Vashchenko V. A., Sinkevitch V. F. Physical limitations of semiconductor devices. Springer. 2008. P. 330.
31. Irvin J. C. The Reliability of GaAs FETs (chapter 6) in GaAs FET Principle and Technology, J. W. Dilorenzo and D. D. Khandelwal (eds). Washington: Artech House, 1982.

M. O. Makeev, Junior Researcher, Engineer 1 cat., e-mail: mc.stiv@gmail.com, Yu. A. Ivanov, Professor, e-mail: y-a-ivanov@mail.ru, S. A. Meshkov, Associate Professor, e-mail: meshkow@bmstu.ru, V. Yu. Sinyakin, Graduate Student, Bauman Moscow State Technical University

Investigation of Thermal Degradation of Resonant Tunneling Diodes Based on Nanoscale AlAs/GaAs Heterostructures

In this paper the thermal degradation of resonant tunneling diodes was investigated. The research was based upon the method of accelerated aging of semiconductors. As a result, the activation parameters of aluminum and silicon diffusion (activation energy and pre-exponential factor) in the resonance tunneling structure and in the contact area, as well as the dependence of AuGeNi ohmic contact resistance on time and temperature were identified.

Keywords: AlAs/GaAs heterostructure, resonant tunneling diode, non-linear radio transmitters, degradation phenomena, thermal influence, diffusion coefficient, contact resistance, IR spectral ellipsometry

References

1. Alkeev N. V., Averin S. V., Dorofeev A. A., Gladysheva N. B., Torgashin M. Yu. GaAs/AlAs resonant-tunneling diode for subharmonic mixers. *Russian Microelectronics*. 2010. V. 39, N. 5. P. 331–339.
2. Vyuginov V. N., Gudkov A. G., Dobrov V. A., Meshkov S. A., Popov V. V. Geterostrukturalnaya SVCh-elektronika v Rossii [Heterostructural SHF-electronics in Russia: the present day]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2012. N. 1. P. 4–9.
3. Ivanov Y. A., Meshkov S. A., Fedorenko I. A., Fedorkova N. V., Shashurin V. D. Subharmonic mixer with improved intermodulation characteristics based on a resonant tunnel diode. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2010. V. 55, N. 8. P. 982–988.
4. Ivanov Yu. A., Meshkov S. A., Fedorkova N. V., Fedorenko I. A. Uluchshenie parametrov priemnika SVCh-diazona primeneniem rezonansno-tunnel'nogo nanodioda v preobrazovatele chastoty [Improved receiver parameters using microwave resonant tunneling nanodiode frequency converter]. *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman, Ser. Priborostroenie*. 2010. Spec. vypusk "Nanoinzheneriya". P. 128–137.
5. Ivanov Yu. A., Meshkov S. A., Sinjakin V. Yu., Fedorenko I. A., Fedorkova N. V., Fedorov I. B., Shashurin V. D. Povyshenie pokazatelej kachestva radioelektronnih sistem novogo pokolenija za schet primeneniya rezonansno-tunnel'nyh nanodiodov [Increase of quality of radio-electronic systems of new generation due to application of resonant tunneling nanodiods]. *Nanoinzheneriya* [Nanoengineering]. 2011. N. 1. P. 34–43.
6. Gorlov M. I., Strogonov A. V. Gerontologija integral'nykh skhem: prognozirovanie dolgovechnosti IS [Gerontology of integrated circuits: predicting of durability of IP]. *Peterburgskii zhurnal elektroniki* [Petersburg Journal of Electronics]. 1996. N. 4. P. 35–41.
7. IR-VASE User's Manual. J. A. Woollam Co., Inc., 2006.
8. Yu S., Gösele U. M., Tan T. Y. A model of Si Diffusion in GaAs based on the effect of the Fermi level. *J. Appl. Phys.* 1989. V. 66, N. 7. P. 2952–2961.
9. Chen C.-H., Gösele U. M., Tan T. Y. Dopant diffusion and segregation in semiconductor heterostructures: Part III, diffusion of Si into GaAs. *Appl. Phys. A*. 1999. V. 69. P. 313–321.
10. You H.-M., Gösele U. M., and Tan T. Y. A study of Si outdiffusion from predoped GaAs. *J. Appl. Phys.* 1993. V. 73, N. 11. P. 7207–7216.
11. Pavesi L., Nguyen Hong Ky, Ganiere J. D., Reinhardt F. K., Baba-Ali N., Harrison I., Tuck B., Henini M. Role of point defects in the silicon diffusion in GaAs and $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ and in the related superlattice disordering. *J. Appl. Phys.* 1992. V. 71, N. 5. P. 2225–2237.
12. Bracht H., Haller E. E., Eberl K., Cardona M. Self- and interdiffusion in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs isotope heterostructures. *Appl. Phys. Lett.* 1999. V. 74, N. 1. P. 49–51.
13. Wee S. F., Chai M. K., Homewood K. P., Gillin W. P. The activation energy for GaAs/AlGaAs interdiffusion. *J. Appl. Phys.* 1997. V. 82, N. 10. P. 4842–4846.
14. Olmsted B. L., Houde-Walter S. N. Al-Ga interdiffusion through group III-vacancy second nearest-neighbor hopping. *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 63, N. 4. P. 530–532.
15. Wang L., Hsu L., Haller E. E., Erickson J. W., Fischer A., Eberl K., Cardona M. Gaself-diffusion in GaAs isotope heterostructures. *Phys. Rev. Lett.* 1996. V. 76. P. 2342–2345.
16. Ono H., Ikarashi N., Baba T. Al diffusion into GaAs monatomic AlAs layers investigated by localized vibrational modes. *Appl. Phys. Lett.* 1995. V. 66, N. 5. P. 601–603.
17. Palik E. D. *Handbook of optical constants of solids*. V. 1. N. Y.: Academic Press, 1985. 785 p.
18. Fox M. *Optical properties of solids*. Oxford University Press, 2001. 318 p.
19. Palik E. D. *Handbook of optical constants of solids*. V. 2. N. Y.: Academic Press, 1991. 1096 p.
20. Svitashcheva S. N. Ellipsometrija sherohovatykh poverhnostej. Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.07: Novosibirsk [Ellipsometry of rough surfaces: candidate's dissertation]. 2009.
21. Aspnes D. E. Optical properties of thin films. *Thin Solid Films*. 1981. V. 89, N. 3. P. 249–262.
22. Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Meshkov S. A., Gil'man A. B. and Yablokov M. Yu. Application of IR ellipsometry to determination of the film thickness of a polytetrafluoroethylene sample modified in direct-current discharge. *High Energy Chemistry*. 2011. V. 45, N. 6. P. 536–538.
23. Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Meshkov S. A. Issledovanie degradacionnykh javlenij v nanorazmernykh AlAs/GaAs geterostruktur ah metodom IK-spektrojellipsometrn [The investigation of degradation phenomena or nanoscale AlAs/GaAs heterostructures by IR-spectral ellipsometry]. *Nanoinzheneriya* [Nanoengineering]. 2011. N. 4. P. 44–48.
24. Agazieva S. V., Shashurin F. D. Vlijanie processa degradacii nanodioda na kachestvo nelinejnogo preobrazovatelya signalov [Influence of nanodiode's degradation on quality of nonlinear signal converter]. *Nanoinzheneriya* [Nanoengineering]. 2011. N. 3. P. 36–40.
25. Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Meshkov S. A., Shashurin V. D. K voprosu o povyshenii nadezhnosti smesitel'nykh AlAs/GaAs rezonansno-tunnel'nykh diodov konstruktorsko-tehnologicheskimi metodami [About reliability improvement of mixing AlAs/GaAs resonant tunneling diodes by design and engineering means]. *Nauka i obrazovanie: jelektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie* [Science and education: electronic scientific and technical journal]. 2013. N. 11. P. 229–243.
26. Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Litvak Yu. N., Meshkov S. A., Migal D. E., Nazarov V. V. Modelirovanie kinetiki vol't-ampernykh harakteristik AlAs/GaAs RTD v rezul'tate diffuzionnykh processov v ego strukture [Modeling of the kinetics of the current-voltage characteristics AlAs / GaAs RTD as a result of the diffusion processes in its structure]. *Nanoinzheneriya* [Nanoengineering]. 2014. N. 1. P. 24–29.
27. Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Meshkov S. A., Nazarov V. V. Issledovanie termicheskoy degradacii AuGeNi omicheskikh kontaktov rezonansno-tunnel'nykh diodov na baze nanorazmernykh AlAs/GaAs geterostruktur [Study of thermal degradation of AuGeNi ohmic contacts of resonant tunneling diodes based on nanoscale AlAs/GaAs heterostructures]. *Nauka i obrazovanie: jelektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie* [Science and education: electronic scientific and technical journal]. 2012. N. 09. P. 14.
28. Murakami M. Development of refractory ohmic contact materials for gallium arsenide compound semiconductors. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2002. V. 3. P. 1–27.
29. Blank T. V., Goldberg Yu. A. The current flow mechanism in metal semiconductor ohmic contact. *Semiconductors*. 2007. V. 41. N. 11. P. 1281–1308.
30. Vashchenko V. A., Sinkevitch V. F. *Physical limitations of semiconductor devices*. Springer. 2008. 330 p.
31. Irvin J. C. *The Reliability of GaAs FETs (chapter 6) in GaAs FET Principle and Technology*. J. W. Diloranzo and D. D. Khandelwal (eds) // Washington: Artech House, 1982.

СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ SYSTEMS ON CHIP

УДК 51-74

А. В. Вишнеков, д-р техн. наук, проф., зав. каф., **В. В. Ерохин**, канд. техн. наук, доц.,
Е. М. Иванова, канд. техн. наук, доц., Московский институт электроники и математики
Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики" (МИЭМ НИУ ВШЭ),
Москва, avishnekov@hse.ru., vladimir.v.erokhin@gmail.com, emivanova@hse.ru

ВЕРИФИКАЦИЯ СНК: ВЫБОР СТРАТЕГИИ

Поступила в редакцию 16.07.2014

Рассматривается подход к определению базовой стратегии верификации системы на кристалле (СНК) с учетом заданных критериев. Под стратегией понимается комплекс процедур тестирования и верификации с помощью программных и технических средств. Показано, что задача выбора стратегии верификации является сложной многокритериальной задачей принятия решения и может быть представлена как последовательность задач выбора стратегии верификации и распределения затрат на отдельные этапы верификации. Предложены индивидуальные и групповые методы поддержки принятия решений, позволяющие построить итерационную процедуру поиска наиболее эффективного решения указанных выше задач.

Ключевые слова: система на кристалле (СНК), теория принятия решений, design flow, верификация, тестирование

Введение

Система на кристалле (СНК) — сложное устройство, содержащее большое число аналоговых и цифровых сложных функциональных блоков (СФ блоков), работает, как правило, под управлением операционной системы. Оттестировать и верифицировать такое устройство — очень трудоемкая задача.

Современные технологии производства СНК чрезвычайно затратны, также очень дорого, по меркам средних фирм, стоят средства разработки, отладки, а также цена ошибки в готовом кристалле, не найденной в процессе тестирования и верификации, очень велика. Поэтому необходимо, чтобы кристалл СНК был работоспособным с первой, в крайнем случае, второй попытки его производства. Но достичь этого можно только очень тщательным тестированием и верификацией всего проекта еще до стадии изготовления. Только так можно избежать ошибок в проекте [1].

Очевидно, фирма-разработчик СНК практически не может повлиять на стоимость изготовления кристалла на выбранной фабрике, поэтому единственным способом сократить затраты является снижение стоимости отладки и верификации кристалла.

В разработке СНК отсутствуют справедливые для всех случаев четкие стандарты и предписания, касающиеся процедур, которые необходимо выполнять в процессе тестирования и верификации проекта СНК. Каждое предприятие имеет свой

собственный маршрут проектирования, так называемый *design flow* [2—4]. Этот маршрут зависит от финансовых возможностей фирмы, сложившейся на предприятии практики, квалификации персонала и т. д. Тем не менее можно выделить некоторые базовые, "чистые", стратегии, комбинация которых и используется практически любой фирмой-разработчиком СНК.

Возможны следующие стратегии верификации СНК.

1. *Тестирование и верификация чисто программными средствами.*

T1. Тестирование и верификация с использованием тестбенчей (тестовых установок), написанных на языках HDL. Хотя этот подход более характерен при разработке IP-блоков, он может применяться и для системы в целом.

T2. Тестирование и верификация с использованием специальных программ, предназначенных для целей тестирования и верификации. Это System C, System Verilog, Vera и др. Такие программные средства содержат примитивы и специальные средства для тестирования сложных компонент, например Ethernet.

2. *Тестирование натурными испытаниями.* Здесь возможны два варианта.

T3. Использование отладочных плат и/или комплексов на основе FPGA, в которых синтезируется разрабатываемое устройство. Здесь недостатки такие: не все характеристики разрабатываемого уст-

ройства можно проверить, так как частота, полученная на таких устройствах, может быть существенно ниже ожидаемой в СНК. То же самое можно сказать и о мощности. Например, тестирование и отладка Ethernet 1000 на относительно современных недорогих FPGA могут быть затруднительны, так как в этом случае нельзя масштабно снижать частоту устройств, с которыми осуществляется взаимодействие.

T4. Изготовление тестового кристалла, на котором и проводится окончательная отладка СНК. Метод вполне может быть использован в случае относительно простого проекта и использования недорогих на данный момент технологий изготовления кристаллов, например 0,13, 0,16 мкм и ниже. Преимущества очевидны, так как отладка и верификация ведется на том устройстве, которое и проектируется. Но, как правило, требуется несколько итераций, пока устройство будет верифицировано полностью, а это удорожает разработку.

Как уже было сказано ранее, в чистом виде описанные стратегии "только T1", или "только T2", или "только T3", или "только T4" применяют очень редко. Как правило, используют смешанные подходы. Задача экспертов — найти базовую стратегию, которая является некоторой комбинацией перечисленных выше стратегий, и определить, каким образом надо распределить средства по этапам, чтобы продукт (СНК) получился гарантированно рабочим и недорогим.

1. Постановка задачи выбора рациональной стратегии верификации СНК

Можно поставить вопрос следующим образом. Как создать стратегию для данной СНК, обеспечивающую удовлетворительное тестирование и верификацию проекта в приемлемые сроки с наименьшей стоимостью? Ответом может быть предложение разбить верификацию СНК на две фазы.

Первая фаза верификации будет заключаться в выборе верной стратегии (унитарной или комбинированной, являющейся композицией нескольких стратегий верификации).

Вторая фаза верификации будет заключаться в рациональном распределении затрат (финансовых, трудовых, ...) между этапами верификации, если в качестве последовательности работ выбрана комбинированная стратегия верификации (в несколько этапов). Очень важно правильно распределить затраты на каждом этапе, чтобы обеспечить выход рабочего СНК с первого запуска кристалла.

Практика показывает, что в качестве возможных альтернатив в первой фазе можно использовать следующие композиции стратегий (T1, T2, T3, T4), (T1, T2, T4), (T1, T3, T4), (T1, T4). Объяснение этому такое. Изготовление кристалла является заключительным этапом и, собственно го-

воря, целью проекта. Верификация готового кристалла необходима, поэтому T4 присутствует во всех вариантах. Использование тестбенчей в той или иной степени также практически неизбежно, хотя бы для частей проекта, за исключением чисто гипотетического варианта, когда проект СНК собирается из полностью готовых IP-блоков. Таким образом, мы рассматриваем все возможные практически значимые варианты.

Задача разработчиков и экспертов будет сводиться к выбору базовой стратегии верификации и возможных альтернативных комбинаций. Рассмотрим названные выше альтернативы решения задачи выбора для первой фазы работ:

- альтернатива A1 — комбинированная стратегия (T1, T2, T3, T4);
- альтернатива A2 — комбинированная стратегия (T1, T2, T4);
- альтернатива A3 — комбинированная стратегия (T1, T3, T4);
- альтернатива A4 — комбинированная стратегия (T1, T4).

2. Пример выбора наиболее приемлемой стратегии верификации

Решение задачи выбора следует начинать с формирования критериев отбора. Для формирования перечня критериев может быть создана группа экспертов или данный перечень может быть составлен лицом, принимающим решение (ЛПР), назначенным для принятия решения по данному вопросу. В качестве критериев отбора целесообразно указать:

K1 — суммарная стоимость работ;

K2 — трудозатраты;

K3 — сроки проведения полной верификации;

K4 — качество (полнота) верификации.

Число и виды критериев могут быть изменены согласно условиям выполнения проекта.

Решение задачи выбора альтернативы следует начинать с формирования критериев оценки качества альтернатив. Тогда задача выбора альтернативной стратегии верификации может быть поставлена как задача принятия решения, для которой можно использовать методы поддержки принятия решений. В дальнейшем такой способ решения позволит упростить и автоматизировать процедуру выбора одной наиболее приемлемой альтернативы по названным критериям.

Для любого метода поддержки принятия решений требуется определить/задать вес каждого критерия ($C_i, i = 1, \dots, 4$). Поэтому следующим шагом в решении задачи выбора базовой стратегии верификации будет расчет весов выбранных критериев отбора ($C_1, \dots, C_4$). Для этого можно воспользоваться одним из методов поддержки принятия решений, например, методом аналитических иерархий, методом ранга, методом предпочтений [5].

Первый названный метод поддержки принятия решений может быть использован ЛПР (руководителем проекта) единолично, два последних метода требуют учета мнения группы экспертов, что позволит сделать решение более точным и обоснованным с разных точек зрения.

Пример использования этих методов можно увидеть в работе [6] для выбора МК. Пусть, например, были получены следующие весовые оценки критериев: $C_1 = 0,4$; $C_2 = 0,1$; $C_3 = 0,3$; $C_4 = 0,2$.

На следующем шаге решается задача выбора наиболее предпочтительной альтернативы. В этом случае могут быть использованы различные методы, в частности метод перестановок. Данный метод наиболее эффективен при небольшом числе альтернатив, так как при этом число перестановок невелико. Основными используемыми процедурами являются процедуры расчета весов критериев и процедура сравнения оценок альтернатив по шкале одного критерия, которая является допустимой по результатам психологических исследований. Процедура назначения весов критериев, хотя и является сложной, но может быть представлена в виде последовательности допустимых процедур с помощью уже названных методов аналитических иерархий, метода ранга, метода предпочтений.

Вначале следует оценить взаимную ценность каждой альтернативы по каждому критерию. Для наглядности можно составить сравнительные таблицы (табл. 1–4), где в ячейке строки i и столбца j знаком $>$ отмечено, что альтернатива A_i предпочтительнее A_j по рассматриваемому критерию, и наоборот знаком $<$ отмечено, что альтернатива A_i

хуже A_j , а знаком $=$ отмечено, что альтернатива A_i равноценна A_j .

Согласно методу перестановок следует поочередно проводить попарное сравнение альтернативы A_i ($i = 1, 2, 3, 4$) со всеми остальными альтернативами A_j ($j = 1, 2, 3, 4$; $i \neq j$) суммируя веса критериев, при которых альтернатива A_i предпочтительнее A_j (Σ_{ij}) и отдельно веса критериев, при которых альтернатива A_j предпочтительнее A_i (Σ_{ji}).

Далее вычисляем разность этих сумм $\Delta_{ij} = \Sigma_{ij} - \Sigma_{ji}$. Сложив получившиеся значения для каждой альтернативы, можно рассчитать ценность каждой альтернативы ($U_{Ai} = \sum_{j=1}^4 \Delta_{ij}$), а затем выбрать наилучшую по максимальной ценности. Дальнейшие расчеты удобно свести в таблицу (табл. 5).

Согласно выбранным критериям и их весам предпочтительной является альтернатива $A_3 = (T_1, T_3, T_4)$. На этом оканчивается первая фаза верификации.

3. Пример выбора наиболее приемлемого способа распределения затрат на этапы верификации

На второй фазе решения задачи следует рационально распределить затраты между отдельными этапами верификации (T_1, T_3, T_4). Затраты на эти стратегии могут быть следующими: (S_{1i}, S_{3i}, S_{4i}), где индекс i обозначает вариабельность затрат в каждой выбранной стратегии. Например, затраты могут быть распределены несколькими способами:

- первый способ — ($S_{12} = 33\%$, $S_{32} = 33\%$, $S_{42} = 33\%$) — альтернатива Z_1 ;
- второй способ — ($S_{11} = 50\%$, $S_{31} = 30\%$, $S_{41} = 20\%$) — альтернатива Z_2 ;

Таблица 1

Относительная ценность альтернатив по критерию K_1

	A_1	A_2	A_3	A_4
A_1	=	<	<	<
A_2	>	=	<	<
A_3	>	>	=	<
A_4	>	>	>	=

Таблица 2

Относительная ценность альтернатив по критерию K_2

	A_1	A_2	A_3	A_4
A_1	=	>	<	<
A_2	<	=	<	<
A_3	>	>	=	<
A_4	>	>	>	=

Таблица 3

Относительная ценность альтернатив по критерию K_3

	A_1	A_2	A_3	A_4
A_1	=	>	>	>
A_2	<	=	<	>
A_3	<	>	=	>
A_4	<	<	<	=

Таблица 4

Относительная ценность альтернатив по критерию K_4

	A_1	A_2	A_3	A_4
A_1	=	>	>	>
A_2	<	=	<	>
A_3	<	>	=	>
A_4	<	<	<	=

Таблица 5

Расчеты по методу перестановок

i	Σ_{ij}				Δ_{ij}				U_{Ai}
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	
1	—	$\Sigma_{12} = 0,6$	$\Sigma_{13} = 0,5$	$\Sigma_{14} = 0,5$	—	$\Delta_{12} = 0,2$	$\Delta_{13} = 0$	$\Delta_{14} = 0$	0,2
2	$\Sigma_{21} = 0,4$	—	$\Sigma_{23} = 0$	$\Sigma_{24} = 0,5$	$\Delta_{21} = -0,2$	—	$\Delta_{23} = -1$	$\Delta_{24} = 0$	-1,2
3	$\Sigma_{31} = 0,5$	$\Sigma_{32} = 1$	—	$\Sigma_{34} = 0,5$	$\Delta_{31} = 0$	$\Delta_{32} = 1$	—	$\Delta_{34} = 0$	1
4	$\Sigma_{41} = 0,5$	$\Sigma_{42} = 0,5$	$\Sigma_{43} = 0,5$	—	$\Delta_{41} = 0$	$\Delta_{42} = 0$	$\Delta_{43} = 0$	—	0

- третий способ — ($S13 = 60\%$, $S33 = 20\%$, $S43 = 20\%$) — альтернатива $Z3$.

Это означает, что в рамках одной комбинированной стратегии возможны существенные перераспределения затрат. По сути, это значит, что число стратегий бесконечно даже в рамках выбранной стратегии ($T1$, $T3$, $T4$) с учетом разного распределения затрат.

Для выбора одной из альтернатив Z_i распределения затрат предлагается использовать методы кластеризации экспертных оценок [6, 10]. Основное достоинство этого метода заключается в том, что он позволяет отказаться от процедуры голосования, согласно которой каждый эксперт должен однозначно определить свой выбор ("за" или "против"), это может быть интерпретировано как две крайние оценки в 100 или 0 баллов. При использовании метода кластеризации каждый эксперт может выставить любую балльную оценку (от 0 до 100). Процедура голосования экспертов заменяется итерационной процедурой согласования экспертных мнений, позволяющей получить более взвешенную оценку альтернатив с учетом мнений и компетентности всех экспертов. Процедура кластеризации позволяет детально анализировать всю палитру мнений экспертов и выявить одну или несколько доминирующих оценок с возможностью последующей коррекции мнений экспертов, а также повысить вероятность нахождения действительно объективных оценок альтернатив.

Согласно данному методу следует выбрать группу экспертов ($\mathcal{E}1$, $\mathcal{E}2$, ...). Каждый эксперт имеет определенную значимость своего голоса — компетентность для данного проекта. Эта компетентность задается ЛПР. Допустим, в нашем примере в групповой процедуре участвуют три эксперта и веса голосов экспертов расставлены следующим образом: $W_1 = 0,4$; $W_2 = 0,3$; $W_3 = 0,3$.

Далее выбираются критерии сравнения альтернатив. Можно предложить, например, критерии, наиболее часто использующиеся на практике:

$K1$ — необходимая квалификация персонала;

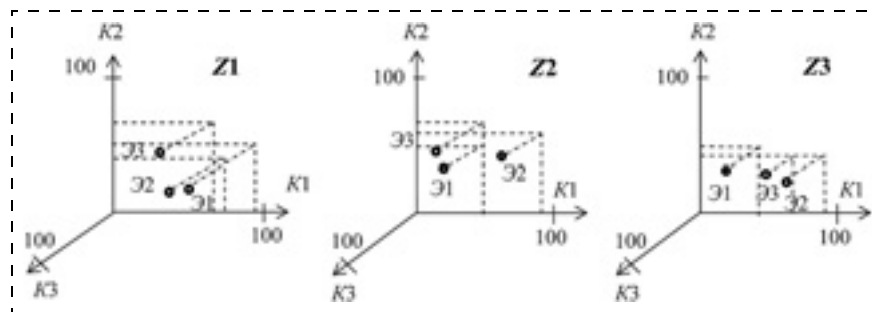


Рис. 1. Расположение оценочных точек в трехмерном пространстве для каждой альтернативы

$K2$ — наличие необходимых средств верификации;

$K3$ — полнота верификации;

$K4$ — длительность верификации;

$K5$ — сложность верификации.

Рассмотрим пример, в котором были выбраны три ($n = 3$) первых критерия отбора альтернатив ($K1$, $K2$, $K3$), а их весовые оценки, рассчитанные одним из тех же методов, что и на первой фазе, составят: $P_1 = 0,2$; $P_2 = 0,3$; $P_3 = 0,5$.

Далее каждый эксперт, используя 100-балльную шкалу, оценивает каждую альтернативу Z_i по каждому критерию, тем самым мы получаем для каждой альтернативы набор точек в n -мерном (по числу критериев) пространстве — ее оценки разными экспертами по разным критериям. Каждая точка сначала помещается в отдельный кластер, а затем кластеры объединяют во все более крупные, пока все объекты выборки (точки) не будут содержаться в одном кластере. Для нашего примера с тремя критериями пространство будет трехмерным. Такое число критериев выбрано намеренно для наглядности рисунков, иллюстрирующих примеры процедур кластеризации. Однако при увеличении числа критериев изменения расчетов не сильно усложнятся: увеличится число координат каждой точки/оценки, в расчетных формулах изменится верхняя граница индекса i — максимальный номер критерия.

Допустим, были получены следующие экспертные оценки (табл. 6–8) и следующее расположение оценочных точек (рис. 1).

Процедура согласования мнений экспертов заключается в следующем. Каждому эксперту пред-

Таблица 6

Экспертные оценки альтернатив по критерию $K1$

x_{1j}	$Z1$	$Z2$	$Z3$
$\mathcal{E}1$	90	50	40
$\mathcal{E}2$	70	90	90
$\mathcal{E}3$	60	50	70

Таблица 7

Экспертные оценки альтернатив по критерию $K2$

x_{2j}	$Z1$	$Z2$	$Z3$
$\mathcal{E}1$	50	50	50
$\mathcal{E}2$	40	60	40
$\mathcal{E}3$	70	70	40

Таблица 8

Экспертные оценки альтернатив по критерию $K3$

x_{3j}	$Z1$	$Z2$	$Z3$
$\mathcal{E}1$	90	60	50
$\mathcal{E}2$	70	50	50
$\mathcal{E}3$	70	60	40

лагается обосновать свои выставленные оценки. Данные комментарии становятся доступны всем экспертам. Возможно после этого кто-то из экспертов изменит свое мнение, тогда проводится повторный опрос и выставление новых оценок. Если после этой процедуры явного фаворита среди альтернатив не наблюдается, то следует получить общую взвешенную оценку альтернатив, наиболее близкую к мнению каждого эксперта с учетом веса каждого критерия и компетентности каждого эксперта.

Этого можно достичь несколькими путями.

1. Объединить все оценки (точки) в один кластер и вычислить центр масс этого кластера с учетом компетентности каждого эксперта [7].

2. Если среди оценок/точек большинство расположено близко друг к другу и только единичные оценки резко отличаются от общего мнения экспертов, то можно пренебречь последними, а остальные объединить в один кластер и вычислить центр масс этого кластера [10].

3. Провести поэтапную процедуру восходящей кластеризации [7–9] — объединения отдельных близко расположенных точек в один кластер с нахождением центра масс этого кластера и дальнейшее объединение центров масс всех кластеров до тех пор, пока не останется единственная точка — новая согласованная оценка альтернативы всеми экспертами. Для объединения кластеров можно воспользоваться методом наименьшего расстояния [6, 10]: выбирают кластеры, между которыми расстояние наименьшее.

4. Процедура восходящей кластеризации может быть выполнена также с учетом необходимых уступок в изменении оценок со стороны каждого эксперта кластера [7, 10]. При объединении выбирается один из кластеров, и происходит проверка для всех остальных кластеров (входящих в них точек/оценок), какова будет уступка в изменении оценок при перемещении точки в другой кластер. В качестве наиболее приемлемого решения выби-

рается кластер, для перемещения в который суммарная уступка с учетом весов критериев и компетентности экспертов будет минимальной.

Рассмотрим подробнее каждый из этих методов на примере получения взвешенных оценок по каждой из трех альтернатив. Первым способом рассчитаем взвешенную оценку альтернативы Z1 (рис. 2).

Расчет центра масс образованного кластера выполняем по формулам

$$C_{K1}(Z1) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{1i} W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}; \quad C_{K2}(Z1) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{2i} W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i};$$

$$C_{K3}(Z1) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{3i} W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i},$$

где C_{K1} , C_{K2} , C_{K3} — координаты центра масс в трехмерном пространстве (новые взвешенные оценки альтернативы по критериям $K1$, $K2$, $K3$); x_{ij} — оценка, выставленная альтернативе j -м экспертом по критерию Ki ; W_j — компетентность j -го эксперта. Если число критериев будет больше трех (что сложно наглядно изобразить на рисунке), то это не слишком усложнит вычисления, просто увеличится количество вычисляемых координат (C_{K1} , C_{K2} , C_{K3} , ..., C_{Kn}).

Для нашего примера рассчитаны следующие общие взвешенные оценки альтернативы Z1: $C_{K1}(Z1) = 75$, $C_{K2}(Z1) = 53$, $C_{K3}(Z1) = 78$.

Вторым способом рассчитаем взвешенную оценку альтернативы Z2 (рис. 3). Можно увидеть, что мнения экспертов Э1 и Э3 близки, а мнение эксперта Э2 сильно отличается, значит последним можно пренебречь.

Тогда новый кластер из двух первых оценок будет иметь следующий центр масс:

$$C_{K1}(Z2) = \frac{x_{11} W_1 + x_{13} W_3}{W_1 + W_3};$$

$$C_{K2}(Z2) = \frac{x_{21} W_1 + x_{23} W_3}{W_1 + W_3};$$

$$C_{K3}(Z2) = \frac{x_{31} W_1 + x_{33} W_3}{W_1 + W_3}.$$

Для нашего примера рассчитаны следующие общие взвешенные оценки альтернативы Z2: $C_{K1}(Z2) = 50$, $C_{K2}(Z2) = 59$, $C_{K3}(Z2) = 60$.

Третьим способом рассчитаем взвешенную оценку альтернативы Z3 (рис. 4). На первом

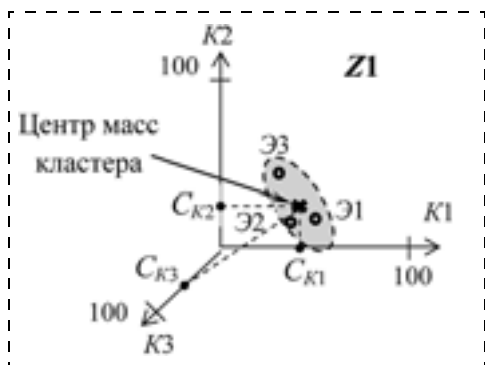


Рис. 2. Процедура кластеризации и определения центра масс — взвешенной оценки альтернативы

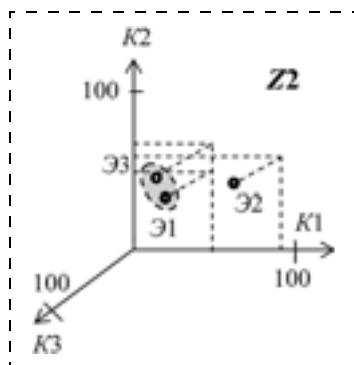


Рис. 3. Процедура учета схожих мнений экспертов и отбрасывания сильно отличающихся

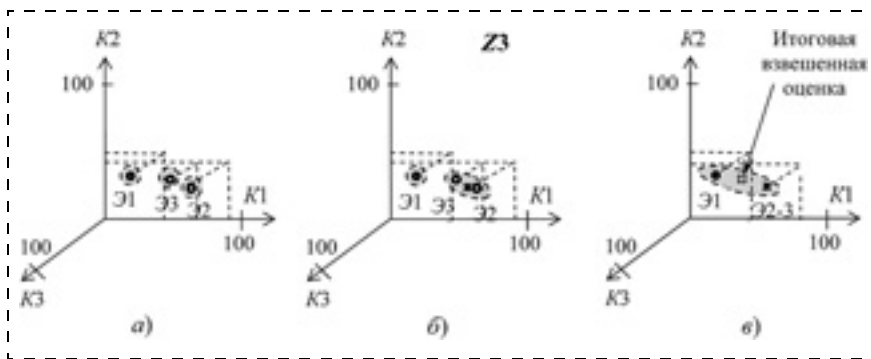


Рис. 4. Процедура поэтапной восходящей кластеризации для альтернативы Z3

шаге будем считать, что каждая оценка образует свой кластер (рис. 4, а).

Для выяснения степени близости мнений экспертов рассчитаем расстояние между каждой парой кластеров по стандартной формуле расстояния между двумя точками в n -мерном пространстве как квадратный корень из суммы квадратов разностей их координат: $|\mathcal{E}1, \mathcal{E}2| \approx 51$; $|\mathcal{E}1, \mathcal{E}3| \approx 33$; $|\mathcal{E}2, \mathcal{E}3| \approx 22$. Очевидно, наиболее близкими являются оценки $\mathcal{E}2$ и $\mathcal{E}3$, которые и будем объединять в новый кластер ($\mathcal{E}2-3$) с расчетом его центра масс (рис. 4, б): (80, 40, 45). Суммарный коэффициент компетентности экспертов, оценки которых расположены в данном кластере (вес суммарного голоса экспертов $\mathcal{E}2$ и $\mathcal{E}3$), будет равна $W_{2-3} = W_2 + W_3 = 0,3 + 0,3 = 0,6$. На следующем шаге новую оценку $\mathcal{E}2-3$ объединим в новый кластер с оценкой $\mathcal{E}1$ с расчетом его центра масс (рис. 4, в): (64, 44, 47). Это и будет итоговая взвешенная оценка альтернативы Z3: $C_{K1}(Z3) = 64$, $C_{K2}(Z3) = 44$, $C_{K3}(Z3) = 47$.

Четвертым способом рассчитаем взвешенную оценку альтернативы Z3 (рис. 5). На первом шаге объединим близкие мнения/точки в общие кластеры и рассчитаем их центры масс (рис. 5, а).

Получим два кластера: первый кластер $\mathcal{E}1$ с центром ($x_{11} = 40$, $x_{21} = 50$, $x_{31} = 50$), второй кластер ($\mathcal{E}2-3$) с центром ($x_{11}^{ц.м} = 80$, $x_{21}^{ц.м} = 40$, $x_{31}^{ц.м} = 45$).

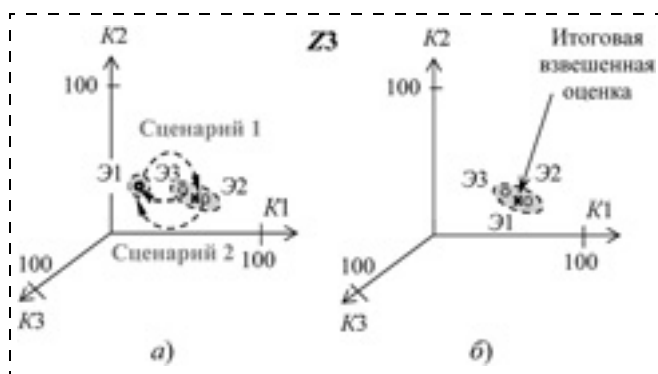


Рис. 5. Процедура восходящей кластеризации для альтернативы Z3 с учетом минимальных уступок

Возможны два сценария дальнейшей кластеризации (см. штриховые стрелки на рис. 5, а).

Сценарий 1. Переместить оценку эксперта $\mathcal{E}1$ во второй кластер (в его центр масс). При этом его суммарная уступка составит

$$S_1 = W_1 \sum_{i=1}^3 (|x_{i1} - x_i^{ц.м}| \cdot P_i) = 5,4.$$

Сценарий 2. Переместить оценки экспертов $\mathcal{E}2$ и $\mathcal{E}3$ в первый кластер. При этом их суммарная уступка составит

$$S_2 = W_2 \sum_{i=1}^3 (|x_{i2} - x_{i1}| \cdot P_i) + \\ + W_3 \sum_{i=1}^3 (|x_{i3} - x_{i1}| \cdot P_i) = 8,1.$$

Очевидно, что минимальной будет уступка первого эксперта при перемещении его оценок в кластер 2—3 (рис. 5, б). Тогда итоговая взвешенная оценка альтернативы Z3 будет составлять $C_{K1}(Z3) = 80$, $C_{K2}(Z3) = 40$, $C_{K3}(Z3) = 45$.

Имея взвешенные оценки всех альтернатив, можно рассчитать ценность каждой i -й альтернативы с учетом весов всех критериев по формуле (для расчетов по нашему примеру возьмем взвешенные оценки, полученные первым, вторым и третьим способами):

$$U_{Zi} = \sum_{j=1}^3 P_j \cdot C_{Kj}(Zi).$$

Для нашего примера $U_{Z1} = 70$, $U_{Z2} = 58$, $U_{Z3} = 50$. Очевидно, что наиболее ценной представляется альтернатива Z1, соответствующая распределению затрат между этапами верификации следующим образом: $S12 = 33\%$, $S32 = 33\%$, $S42 = 33\%$, т. е. поровну.

В результате всех расчетов выбрана общая комбинированная стратегия верификации ($T1$, $T3$, $T4$) с равномерным распределением затрат между тремя этапами верификации.

Заключение

Авторами рассмотрен подход к определению базовой стратегии верификации СНК на основе методов поддержки принятия решений. Задача выбора стратегии верификации разбита на две последовательные фазы верификации: фазу выбора базовой стратегии верификации и фазу распределения затрат по отдельным этапам верификации. Для каждой фазы предварительно выбраны взвешенные критерии оценки альтернатив и рассмотрены ме-

тоды выбора альтернативных решений. Для выбора весов критериев задач первой и второй фазы предложены индивидуальные и групповые методы поддержки принятия решений: метод аналитических иерархий, метод ранга, метод предпочтений. Для решения задачи выбора альтернативы на первой фазе предложен метод перестановок. Для решения задачи выбора альтернативы на второй фазе предложен метод кластеризации экспертных оценок. Рассмотрены конкретные примеры по выбору одной из альтернативных стратегий верификации методом перестановок и методом кластеризации.

Предложенный подход может быть полезен дизайнерам проектирования СНК при выборе стратегии тестирования и верификации, т. е. собственного оптимального "design flow".

Список литературы

1. **Rosenberg S., Meade K.** A Practical Guide to Adopting the Universal Verification Methodology (Uvm). Second Ed. Cadence Design Systems, 2013. 344 p.
2. **Optimize** your SoC/ASIC design flow to address your latest chip design challenges. URL: <http://www.synopsys.com/Services/CapsuleModule/DesignFlow-Deployment-ds.pdf> (дата обращения: 01.07.2014).

3. **Bocchio S., Riccobene E., Rosti A., Scandurra P.** A SoC design flow based on UML 2.0 and SystemC. URL: <http://vsevtme.ru/attachments/show?content=6467> (дата обращения: 01.07.2014).

4. **Huang J.-L.** SoC Design Flow & Tools: Introduction. URL: http://vlsi.cse.vzu.edu.tw/related/SoC/01_Introduction.pdf (дата обращения: 01.07.2014).

5. **Ларичев О. И.** Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах: учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Логос, 2002. 392 с.

6. **Вишнеков А. В., Ерохин В. В., Иванова Е. М.** Автоматизация процедуры выбора микроконтроллера // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 7. С. 14—21.

7. **Коноплев В. В., Назиров Р. Р.** О применении восходящего адаптивного агрегирования для оперативной аналитической обработки и индексирования многомерных данных. М.: Институт космических исследований Российской академии наук. URL: <http://old.lvk.cs.msu.su/files/mco2005/konoplev.pdf> (дата обращения: 01.07.2014).

8. **Пивоварова Л.** Кластеризация документов. URL: <http://www.hse.ru/data/2013/06/10/1283698322/%D0%9F%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D0%9B.%20Text%20clustering.%2012.pdf> (дата обращения: 01.07.2014).

9. **Andrews N. O., Fox E. A.** Recent Developments in Document Clustering. URL: <http://eprints.cs.vt.edu/archive/0000-1000/01/docclust.pdf> (дата обращения: 01.07.2014).

10. **Васильев Ф. Н., Вишнеков А. В., Феропонтова Е. С.** Методы поддержки принятия групповых решений // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. 2007. № 2. С. 51—55.

A. V. Vishnekov, Professor, **V. V. Erokhin**, Associated Professor, **E. M. Ivanova**, Associated Professor, National Research University Higher School of Economics, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Moscow, avishnekov@hse.ru, verohin@hse.ru, emivanova@hse.ru

SoC Verification: Choice of Strategy

Every SoC design center has its own design flow, i.e. process of chip designing, testing, verification and production. The design flow depends on many factors: a finance possibility, personal's quality and even traditions in the firm. As SoC production is very expensive task, every firm try to produce good chip on the first iteration. So the verification of the SoC project is the main task of modern design process.

The article describes generic SOC verification strategy approach selection based on the given set of criterion. Strategy defines the aggregate of verification methods applied with software and hardware based tools. Proven that verification strategy selection is a complex multi-criterion decision maker methodology, thereby may be introduced as a sequence of verification strategy selection and efforts (expenses) diversification per each verification stage. Proposed individual and group methods of the decision evaluation. This allows to construct the most effective iterative look-up procedure for the given objectives.

Keywords: system-on-a chip (SoC), design flow, decision making theory, verification, testing

References

1. **Rosenberg S., Meade K.** A Practical Guide to Adopting the Universal Verification Methodology (Uvm). Second Ed. Cadence Design Systems, 2013. 344 p.
2. **Optimize** your SoC/ASIC design flow to address your latest chip design challenges. URL: <http://www.synopsys.com/Services/CapsuleModule/DesignFlow-Deployment-ds.pdf> (for date: 01.07.2014).
3. **Bocchio S., Riccobene E., Rosti A., Scandurra P.** A SoC design flow based on UML 2.0 and SystemC. URL: <http://vsevtme.ru/attachments/show?content=6467> (for date: 01.07.2014).
4. **Huang J.-L.** SoC Design Flow & Tools: Introduction. URL: http://vlsi.cse.vzu.edu.tw/related/SoC/01_Introduction.pdf (for date: 01.07.2014).
5. **Larichev O. I.** Teoriya i metody prinyatiya resheniy, a takzhe Khronika sobityi v volshebnykh stranakh: Pupil book. 2-nd ed. Moscow.: Logos, 2002. 392 p.

6. **Vishnekov A. V., Erohin V. V., Ivanova E. M.** Avtomatizatsiya protseduryi vyibora mikrokontrollera. Nano- i mikro-sistemnaya tekhnika. 2014. N. 7. P. 14—21.

7. **Konoplev V. V., Nazirov R. R.** O primeneni vshod-yaschego adaptivnogo agregirovaniya dlya operativnoy analiticheskoy obrabotki i indeksirovaniya mnogomernykh dannyih. Institut kosmicheskikh issledovaniy Rossiyskoy akademii nauk Moskva. URL: <http://old.lvk.cs.msu.su/files/mco2005/konoplev.pdf> (for date: 01.07.2014).

8. **Pivovarova L.** Klasterizatsiya dokumentov. <http://www.hse.ru/data/2013/06/10/1283698322/%D0%9F%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D0%9B.%20Text%20clustering.%2012.pdf> (for date: 01.07.2014).

9. **Andrews N. O., Fox E. A.** Recent Developments in Document Clustering. URL: <http://eprints.cs.vt.edu/archive/00001000/01/docclust.pdf> (for date: 01.07.2014).

10. **Vasilev F. N., Vishnekov A. V., Feropontova E. S.** Metodyi podderzhki prinyatiya gruppovyih resheniy. Kachestvo i IPI (CALS)-tehnologii. 2007. N. 2. P. 51—55.

УДК 537.523, 612(075)

И. И. Игнатов, д-р наук Европейской академии естественных наук (Ганновер, Германия), профессор, директор Научно-исследовательского центра медицинской биофизики, София, Болгария, e-mail: mbiph@dir.bg, **О. В. Мосин**, канд. хим. наук, науч. сотр., ФГБОУ ВПО "Московский государственный университет прикладной биотехнологии", e-mail: mosin-oleg@yandex.ru

ЭФФЕКТ КИРЛИАН В ИЗУЧЕНИИ ГАЗОРАЗРЯДНОГО СВЕЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ВОДЫ

Поступила в редакцию 17.06.2014

Приводятся данные о применении эффекта газоразрядного свечения биологических объектов в переменных электрических полях высокой электрической напряженности и частоты (эффект Кирлиан) в биомедицинской диагностике органов человека и изучение биоэлектрических свойств биологических объектов и воды. Получены и проанализированы газоразрядные снимки пальцев рук человека и образцов воды различного происхождения и степени водоочистки. Комбинацией методов цветного Кирлиан-анализа и дифференциального неравновесного энергетического спектра (ДНЭС) проанализированы структурные свойства воды. Рассчитана средняя энергия водородных связей между молекулами H_2O в процессе формирования элементарных кластеров воды (димер, тример), которая составляет $-0,1067 \pm 0,0011$ эВ.

Ключевые слова: эффект Кирлиан, газоразрядная визуализация, ДНЭС, вода

Введение

Эффектом Кирлиан обозначается плазменное свечение электрического разряда (лавиное, коронное, стримерное) на поверхности предметов, находящихся в переменном электрическом поле высокой частоты (10...150 кГц), при котором между электродом и исследуемым объектом возникает поверхностное напряжение 5...30 кВ [1]. В большинстве случаев развиваются две формы газового электрического разряда:

- лавинный разряд в узком зазоре, ограниченном диэлектрическими поверхностями исследуемого объекта и носителем изображения, — зоне ионизации и возбуждения лавинами электронов нейтральных частиц газа;
- скользящий по поверхности диэлектрика коронный разряд, возникающий в неоднородном электрическом поле вблизи электродов с малым радиусом кривизны [2].

При уменьшении степени неоднородности электрического поля (радиус кривизны электрода 1...3 мм), а также с повышением электрического напряжения коронный электрический разряд приобретает не однородную, а стримерную (иногда факельную или кустовую) форму. В этом случае активные процессы выносятся на расстояния 10...20 см от поверхности электрода. Наблюдаемый эффект подобен плазменным явлениям (молнии) и элек-

тостатическому разряду на поверхности любых биологических, органических объектов, а также на неорганических образцах различного характера.

В научной литературе наряду с кирлианографией используются термины биоэлектрография, газоразрядная визуализация (ГРВ) [3], электрический высокочастотный разряд (ЭВР) [4], селективный высокочастотный разряд (СВЧР) [5].

Для визуализации ГРВ-свечения на один электрод подается высокое переменное электрическое напряжение высокой частоты 15 кГц и значением 15 кВ (в других методах ГРВ эти значения принимаются равными 0,2...15 кГц и 5...30 кВ соответственно), а другим электродом служит сам изучаемый объект. Если объектом является человек или его органы, то он не заземляется. Если объект представляет собой предмет неживой природы, то его заземляют с помощью проводника. Электрод и изучаемый объект разделены между собой изолятором — диэлектриком и тонким слоем воздуха, молекулы которого подвергаются диссоциации под действием генерируемого электродом электромагнитного поля, возникающего между электродом и объектом. В этом тонком слое воздуха толщиной 10...100 мкм, находящемся между объектом и электродом, происходят три основных процесса:

- возбуждение, поляризация и ионизация электрическим полем высокой частоты молекул азо-

та (78 масс. % N_2), кислорода (21 масс. % O_2) и двуоксида углерода (0,046 масс. % CO_2) — основных компонентов воздуха. В результате образуется ионизированный газ, т. е. газ с отделенными электронами, обладающими отрицательными зарядами, создающими электропроводящую среду наподобие плазмы;

- образование слабого тока в виде отделившихся от молекул N_2 , O_2 и CO_2 свободных электронов — газового разряда между исследуемым объектом и электродом. Форма ГРВ-свечения, плотность, яркость и поверхностное распределение определяются в основном электромагнитными параметрами объекта;
- переход электронов с низших на высшие энергетические уровни и обратно, в процессе которого происходит излучение дискретного кванта света — фотона в виде излучения. Энергия перехода электрона зависит как от напряжения внешнего электрического поля, так и от электронного состояния изучаемого объекта. Поэтому в различных областях окружающего объекта электрического поля электроны получают разные импульсы энергии, т. е. "перескакивают" на разные энергетические уровни, что приводит к испусканию квантов света разной длины волны (частоты) и энергии. Последний факт регистрируется датчиком, светочувствительной фотобумагой или фотопленкой в виде различных цветов, которые в зависимости от электропроводящих свойств объекта окрашивают контур ГРВ-свечения в различные цветовые гаммы.

Обозначенные выше процессы в своей совокупности дают общую картину эффекта Кирлиан, который позволяет изучать биоэлектрические свойства объекта при взаимодействии с внешним электромагнитным полем, а также взаимодействие электромагнитного поля с другими полями — тепловыми в ИК диапазоне и др. Газоразрядное свечение различных биологических объектов различается по характеру и интенсивности свечения, размерам контура свечения и цветовой гамме. Существуют другие принципиальные схемы визуализации данного эффекта, подробно описанные в работе [6].

Эффект Кирлиан находит все более широкое научно-практическое применение в клинической диагностике в медицине — диагностике общего психофизического состояния человека, определении биологической активности лекарств, выявлении признаков переутомления и перегрузки организма, а также выявлении болезней и патологий различных органов и систем, включая онкологические заболевания [7]. ГРВ-снимки пальцев рук и ног человека также позволяют судить об общем уровне и характере его физиологической активно-

сти и функционирования нервной системы, проводить классификацию состояния по характеру ГРВ-свечения, оценивать энергетику и состояние отдельных органов и систем организма в соответствии с распределением характеристик ГРВ-свечения и следить за влиянием на организм различных воздействий: аллопатических и гомеопатических препаратов, КВЧ-терапии, аутотренинга и т. п. Применение ГРВ целесообразно для мониторинга эффективной коррекции взаимодействия функциональных систем организма в процессе лечения и реабилитации, при анализе лечебного действия и для профилактики побочных эффектов различных видов терапии, для определения дополнительных показаний к аллопатическим методам лечения и объективизации их действия и др.

ГРВ является одним из немногих инструментальных методов, позволяющих быстро, эффективно и безопасно исследовать общее и психоэмоциональное состояние человека, выявлять болезнь до ее клинического проявления, а также подбирать индивидуальные методики лечения и оздоровления, контролировать их эффективность и динамику развития [8]. Данный метод можно проводить среди здорового контингента населения в рамках профессиональных осмотров в школах, на предприятиях и т. д. Это позволяет в некоторых случаях выявлять проблемные (на момент обследования), а также потенциально опасные зоны организма и проводить экспресс-анализ оценки состояния больных в стационарах, поликлиниках, диспансерах, санаториях, позволяющий существенно ограничить круг диагностического поиска. Кроме этого, данный метод является индикатором психофизиологических процессов, протекающих в организме человека. Таким способом можно зафиксировать малейшие колебания психофизического эмоционального состояния человека.

К преимуществам методов ГРВ относятся неинвазивность, безопасность и полная стерильность, отсутствие особых требований к помещению и условиям окружающей среды, низкая себестоимость обследования, наглядность и интерпретируемость получаемых данных, удобство их хранения и последующей компьютерной обработки, возможность слежения за развитием процессов, сопоставления структурных, функциональных и временных процессов в организме.

Современные приборы и оборудование позволяют регистрировать развитие ГРВ-изображения в реальном масштабе времени: прямой ввод ГРВ-изображений в ЭВМ дает возможность проводить качественную и количественную обработку параметров ГРВ-изображений для их более точной оценки [9]. Это дает возможность оценить структурно-функциональное состояние исследуемого органа с

получением стабильных воспроизводимых результатов в реальном масштабе времени. Воспроизводимость результатов зависит от внешних условий (температуры, влажности воздуха и др.).

Значительный научно-практический интерес для биомедицинской диагностики и клинических исследований представляют исследования медицинской визуализации данного эффекта — газоразрядное свечение биологических объектов, в основном организма человека и его органов и воды как основной субстанции жизни.

Целью работы являлось изучение принципиальной возможности использования цветного спектрального Кирлиан-анализа в биомедицинской диагностике органов человека и анализе характера и параметров ГРВ-спектров биологических объектов и воды.

Методика эксперимента

Эксперименты по определению влияния на размеры и характер ГРВ-свечения частоты электрического тока, подаваемого на электрод, получены методом селективного высокочастотного разряда (СВЧР) на приборах Kirlian Videografie B9 (Biomed, Германия) и ГРВ-камера (МедЭО, Россия) с электродом из полиэтилентерефталата (ПЭТФ, хостафан) (электрическая прочность — 160...200 кВ/мм, плотность — 1,38...1,4 г/см³, температура плавления — 260 °С) с электрическим напряжением на электроде 15 кВ, длительностью электрического импульса 10 мкс и частотой электрического тока 15 кГц. В экспериментах использовали четыре частоты электрического тока — 6, 12, 15, 24 кГц. Наряду с видимым диапазоном, для данного метода получены цветные Кирлиан-спектры и ГРВ-граммы в УФ и ИК диапазонах.

Регистрацию ГРВ-свечения проводили в темной комнате при красном светофильтре. На диэлектрическую пластину из хостафана, служащую электродом, создающим поле высокого напряжения, помещали лист чувствительной к излучениям фотобумаги или фотопленки. Исследуемый объект (большой палец руки человека, капли воды) устанавливали сверху листа фотобумаги или фотопленки. Между исследуемым объектом и диэлектрической пластиной подавали импульсы электрического напряжения от генератора электромагнитного поля напряженностью 19,5 В/м при частоте электрического тока 15 кГц, для чего на обратную сторону пластины наносилось прозрачное проводящее электрический ток медное покрытие. При заданной напряженности поля в газовой среде пространства контакта объекта и пластины развивался газовый разряд в виде характерного свечения вокруг объекта — коронного разряда в диапазонах длин волн $\lambda = 280...490$ нм и $\lambda = 560...780$ нм, за-

свечивающего цветную фотобумагу или фотопленку, по которому судили о биоэлектрических свойствах изучаемого объекта.

С помощью цветного спектрального Кирлиан-анализа были проанализированы снимки ГРВ-свечения пальцев рук 750 пациентов, страдающих заболеваниями опорно-двигательного аппарата, позволяющие анализировать характеристики ГРВ-свечения отдельных зон пальцев рук. Также методом цветного спектрального Кирлиан-анализа с комбинацией методов ИК спектроскопии и дифференциального неравновесного энергетического спектрального анализа (ДНЭС) исследованы образцы воды различного происхождения и различной степени водоочистки.

ИК спектры образцов воды регистрировали на Фурье-ИК спектрометре Brucker Vertex (Brucker, ФРГ) (спектральный диапазон: средний ИК — 370...7800 см⁻¹; видимый — 2500...8000 см⁻¹; разрешение — 0,5 см⁻¹; точность волнового числа — 0,1 см⁻¹ на 2000 см⁻¹).

Оценка характеристических параметров изображений методом ГРВ проводилась на основании анализа полученных ГРВ-изображений, обработанных стандартным пакетом программ.

Для регистрации ГРВ-свечения, сохранения в памяти ЭВМ файлов ГРВ-грамм и последующей их обработки использовали программу GDV Capture в двух режимах: для статической (покадровой) съемки и для динамической (видеосъемки).

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с помощью программы статистического пакета STATISTICA 6, используя критерий t-Стюдента (при статистической достоверности < 0,05).

Результаты и их обсуждение

Как показали исследования, для биологических объектов интенсивность характеристики свечения газового электрического разряда зависит как от его собственного электромагнитного излучения, так и от электропроводности организма и кожных покровов, что обуславливается многими параметрами, в том числе и психоэмоциональным состоянием человека и функционированием нервной системы. Интенсивность ГРВ-свечения прямо пропорциональна приложенному на электрод напряжению электрического тока. Необходимо подчеркнуть, что при низком напряжении электрического тока ГРВ-свечение не возникает, а при слишком высоком напряжении возникает угроза пробоя диэлектрика, что крайне нежелательно в экспериментальных исследованиях. Малые частоты электрического тока также могут стать причиной пробоя диэлектрика. Оптимальная нижняя граница частоты электрического тока в ГРВ-диаг-

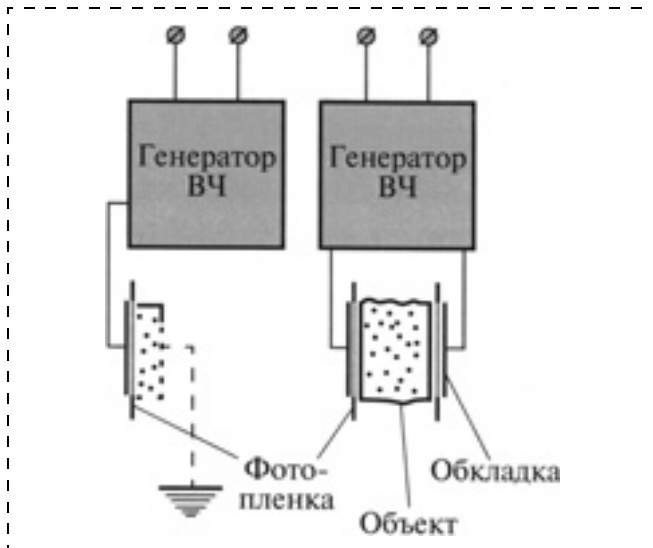


Рис. 1. Принципиальная схема прибора для визуализации ГРВ-свечения

ности принимает равной 500 Гц и зависит от разницы электрических потенциалов между электродом и диэлектриком. Так, для стандартного стеклянного электрода (стекло в качестве диэлектрика) возможно при низких напряжениях электрического тока получить характерное ГРВ-свечение при нижнем пределе частоты тока в 200 Гц. Верхняя частотная граница электрического тока лежит в пределах 15...20 кГц, в зависимости от материала электрода. Между нижней и верхней границей имеются два характерных интенсивных пика: при 650 и 7000 Гц. В первом случае, при низкой частоте электрического тока, большую роль играет электропроводность объекта. Во втором случае, при высокой частоте электрического тока, электрическая проводимость объекта не играет существенной роли, а на первый план выступает собственное электромагнитное поле объекта, которое является неоднородным и не находится в прямой зависимости от электрической проводимости. В качестве электрода может быть использована пластина из твердого полимерного материала (эпоксид, ПЭТФ, хостафан, лавсан), покрытая с одной стороны проводящим электрический ток тонким медным слоем. Функции диэлектрика в данном случае выполняет полимерный материал. Чтобы не возникало пробоя на краях диэлектрика, слой меди на 10 мм от края электрода удаляется. Обработанный таким образом электрод пригоден для работы с высокими напряжениями электрического тока. Принципиальная схема типового прибора для визуализации ГРВ-свечения показана на рис. 1.

Наряду с обозначенными выше эффектами существенную роль в возникновении эффекта Кирлиан играет электрическая проводимость (электропроводность) исследуемого объекта — величина,

обратная электрическому сопротивлению, выражаемая в сименсах (Ом^{-1}).

Зависимость удельной электрической проводимости σ ($\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$) и коэффициента теплопроводности K ($\text{Вт/м} \cdot \text{К}$) определяется законом Видемана—Франца:

$$\frac{K}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right)^2 T,$$

где k — постоянная Больцмана ($1,380662 \times 10^{-23}$ Дж/К), e — заряд электрона ($-1,602176 \times 10^{-19}$ Кл), T — температура (К).

В ходе экспериментов было показано, что электрическая проводимость (электропроводность) объекта практически не отражается на формирование электрического изображения. Формирование последнего зависит от диэлектрической проницаемости.

Для расчета основных физических параметров эффекта Кирлиан используют полученную А. Антоновым и Л. Юскесилюевой [10] экспериментальную зависимость удельной электрической проводимости на единицу площади записывающей среды от параметров электрического разряда:

$$\sigma = \alpha - \left[U_p \frac{(d_2 + \delta)}{\delta d_2} \varepsilon_0 \frac{(d_2 + \delta)}{\delta d_2} \right],$$

где $\delta = \frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_3}{\varepsilon_3}$; α — крутизна фронта электрического импульса; U_p — пробивное напряжение воздушного промежутка между объектом и записывающей средой; d_1 — ширина объекта; d_2 — ширина зоны воздействия электромагнитного поля; d_3 — ширина записывающей среды; ε_1 — диэлектрическая проницаемость объекта; ε_3 — диэлектрическая проницаемость записывающей среды; $\varepsilon_0 = 1,00057$ Ф/м.

Для расчета пробивного электрического напряжения в воздушном промежутке используется формула

$$U_p = 312 + 6,2d_2.$$

В результате математических преобразований получается квадратное уравнение ширины воздушного промежутка

$$6,2d_2^2 + (\alpha T - 6,2\delta - 312)d_2 + 312\delta = 0,$$

которое сводится к стандартному квадратному уравнению:

$$ax^2 + bx + c = 0,$$

где $a = 6,2$; $b = \alpha T - 6,2\delta - 312$; $c = 312\delta$.

Данное квадратное уравнение имеет два решения:

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},$$

соответственно

$$d_{1,2} = \frac{-[\alpha T - 6,2\delta - 312] \pm \sqrt{[\alpha T - 6,2\delta - 312]^2 - 77,376\delta}}{12,4}.$$

Вышеприведенные уравнения позволяют рассчитывать максимальную и минимальную ширину воздушного промежутка для возникновения ГР-свечения, при котором формируется электрическое изображение объекта.

Человеческий организм представляет собой проводник, окруженный слоем диэлектрика (кожей), генерирующий биопотенциалы, связанные с электрической активностью данного органа. Как известно, в поверхностных слоях кожи находятся особые электрические биорецепторы, выполняющие важные функции распознавания различных сигналов (воздействий) и связанные через нервную систему с мозгом и внутренними органами. В пользу этого предположения свидетельствует детектируемый в поверхностных слоях кожи слабый электрический потенциал ~0,05 В. Большие электрические потенциалы, вплоть до ~10 В, могут быть результатом внешней электризации, например, при растирании ладоней одной о другую (трибоэлектрический потенциал) [11]. Кроме этого, поверхность человеческого тела излучает тепловое излучение, детектируемое в ИК диапазоне при длинах волн от 8 до 14 мкм.

При наличии сравнительных таблиц и данных электрического состояния кожного покрова в нормальном и патологическом состояниях можно использовать метод ГРВ как возможный способ ранней диагностики различных заболеваний и патологий в клинической диагностике и медицине. В развитии заболевания выделяются три основных стадии, отчетливо проявляющиеся на ГРВ-граммах: информационная, промежуточная и симптоматическая. Во время информационной стадии клинические симптомы проявляются редко, в основном как случайные проявления. Во второй промежуточной стадии развития заболевания проявляются клинические симптомы, еще не имеющие четкого клинического соответствия. В третьей, симптоматической стадии, симптомы соотносятся с топографическими контурами ГРВ-свечения. Эта стадия характеризуется различными клиническими проявлениями, о которых можно судить по характеристикам ГРВ-свечения. Данные, полученные методом ГРВ, могут не совпадать с результатами клинических исследований, поскольку они

отражают разные уровни проявления (визуализации) тех или иных биологических процессов (патологий) в организме. В соответствии с этим основная цель исследования заключалась в получении достоверных данных и в их сравнительном анализе разными методами — ГРВ и цветным Кирлиан-анализом.

Основная информация в ГРВ-диагностике извлекается из параметрических характеристик ГРВ-свечения, которое представляет собой пространственно распределенную группу участков различной плотности и яркости [12]. ГРВ-свечение с помощью оптической системы и камеры прибора с зарядной связью преобразуется в видеосигналы, которые затем записываются в виде одиночных кадров (ГРВ-грамм) или AVI-файлов в блок памяти ЭВМ, связанный с процессором обработки видеок кадров — специализированный программный комплекс, позволяющий проводить вычисление целого ряда параметров, на основе анализа которых делаются определенные диагностические заключения. Это позволяет осуществлять статическую съемку ГРВ-грамм 10 пальцев рук человека и проводить статическую съемку серии (до 100) ГРВ-грамм жидкостей.

Компьютерный анализ ГРВ-грамм включает в себя секторную диагностику и параметрический анализ. Секторная диагностика основана на диагностической таблице, которая связывает характеристики свечения отдельных зон пальцев рук с функциональным состоянием органов и систем организма. Параметрический анализ основан на оценке более 30 параметров ГРВ-грамм, факторном и корреляционном анализе. Рассматриваются геометрические, яркостные, структурные, фрактальные, вероятностные и другие группы параметров. Пустоты или, наоборот, вспышки на ГРВ-грамме могут быть свидетельством патологий в данной области тела. Эти факторы являются общими при оценке газоразрядных снимков органов человека разными методами ГРВ.

В Болгарском Научно-исследовательском центре медицинской биофизики (НИЦМБ) для визуализации газоразрядного свечения разработан и используется на практике метод селективного высокочастотного разряда (СВЧР) на электроде из полимерного материала хостафана, характеризующегося большой электрической прочностью (160...200 кВ/мм) и отличающегося от обычного ГРВ-метода тем, что электропроводность изучаемого объекта не оказывает существенного влияния на формирование ГРВ-изображения [13—15]. Его формирование зависит в основном от диэлектрической проницаемости. Фотографирование Кирлианового спектра в данной методике является одним из физических методов, при которых качество

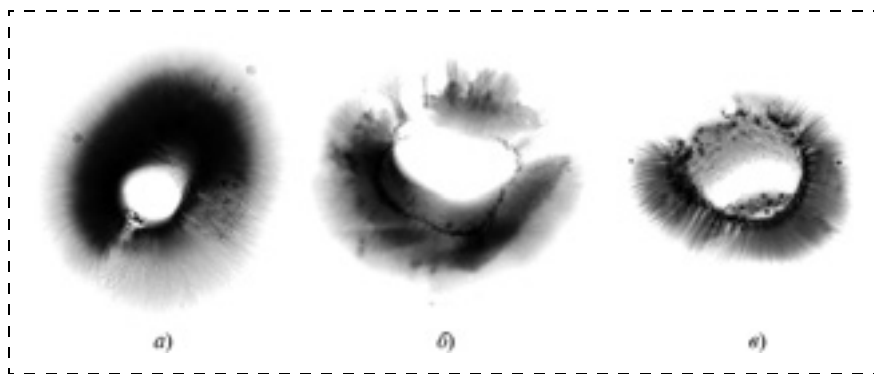


Рис. 2. Виды черно-белых ГРВ-фотографий (большой палец руки человека) методом СВЧР (получены на приборе с электродом из полимера хостафана с электрическим напряжением на электроде 15 кВ и частотой электрического тока 15 кГц): "корона" ("corona") (а), "ореол" ("halo") (б) и "точкообразный" ("spotted") (в) (данные И. Игнатова)

изображения при использовании фотопленки выше, чем при использовании фотокамеры "Полароид" или цифровых методов ЭВМ. Электрическое напряжение, подаваемое на электрод прибора, составляет 15...30 кВ при частоте электрического тока 15 кГц. В ходе экспериментов было получено 2500 ГРВ-грамм различных биологических объектов и проведен их параметрический анализ. Также получены ГРВ-граммы в УФ и ИК диапазонах, сравнение которых позволяет проводить анализ проблемных областей на ГРВ-граммах.

Исследования, проведенные в НИЦМБ (г. София, Болгария), показали, что интенсивность, характер (цветовая гамма) и структура ГРВ-свечения живых тканей в переменном электрическом поле зависит от исходного состояния объекта (уровня его метаболических процессов, функционального состояния отдельных органов и тканей, специфики протекания патологических процессов и др.).

В процессе регистрации черно-белых Кирлиановых фотографий выделяются три вида газоразрядной визуализации биологических объектов (пальцы рук человека), наблюдающихся при применении метода СВЧР: "корона" (а), "ореол" (б) и "точкообразный" (в) (рис. 2). В результате статистической обработки полученных данных с помощью критерия Стьюдента ($p < 0,05$) показано, что минимальная ширина ореола вокруг большого пальца руки составляет $6,3 \pm 0,09$ мм, а максимальная ширина — $8,7 \pm 0,1$ мм.

Также проведены эксперименты для изучения влияния на размеры и характер ГРВ-свечения частоты электрического тока, подаваемого на электрод. Для этого использовались четыре частоты электрического тока — 6, 12, 15, 24 кГц. Как показали исследования, контуры ГРВ-свечения при 12 и 15 кГц однородны. Контур ГРВ-свечения при частоте 6 кГц составляет 55 % от контура при 15 кГц, а при 24 кГц — всего 15 % от контура при 15 кГц,

что важно для дальнейшего анализа и идентификации снимков. Согласно полученным данным, падение биоэлектрической активности тела способствует уменьшению интенсивности ГРВ-свечения. Патологии в человеческом организме также изменяют биоэлектрическую активность и изменяют форму и цветовую гамму ГРВ-свечения, которая определяется в основном энергией излучения фотонов при переходе электронов с высших энергетических уровней на низшие при возбуждении электрическим полем. При красном цвете эта энергия состав-

ляет 1,82 эВ, при оранжевом цвете — 2,05 эВ, при желтом — 2,14 эВ, при сине-зеленом — 2,43 эВ, при синем — 2,64 эВ, а при фиолетовом — 3,03 эВ. Таким образом, чем больше преобладают в спектре желтые, оранжевые, синие, сине-зеленые и фиолетовые цвета, тем ярче выражена газоразрядная визуализация и биоэлектрические свойства объекта. Согласно полученным данным падение биоэлектрической активности тела способствует уменьшению интенсивности ГРВ-свечения. Исследования проводились на 750 пациентах. Показано, что падение общей биоэлектрической активности тела, а также патологии в человеческом организме изменяют биоэлектрическую активность и уменьшают видимые размеры ГРВ-свечения. ГРВ-свечение здорового (рис. 3, а) и больного (рис. 3, б) человека различаются. Эта зависимость закономерна для многих заболеваний (болезни суставов, болезни позвоночника, онкологические заболевания и др.).

Метод цветного спектрального Кирлиан-анализа был также апробирован для изучения свойств

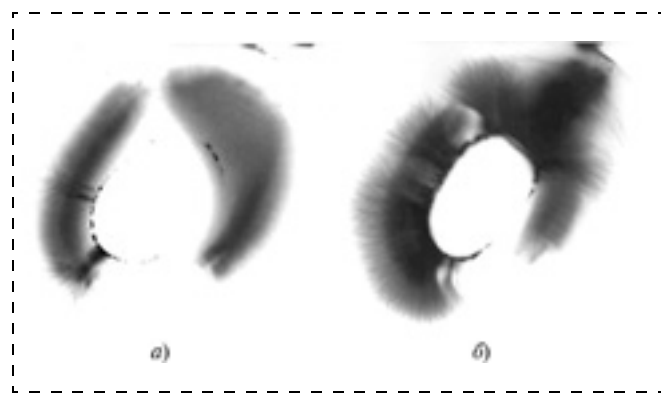


Рис. 3. ГРВ-свечение большого пальца руки здорового (а) и больного (б) человека: электрическое напряжение на электроде — 15...30 кВ, частота электрического тока — 15 кГц (данные И. Игнатова)

воды, из которой на 70...80 % состоят биологические объекты [16]. В соответствии с современными представлениями вода рассматривается как ассоциированная жидкость, состоящая из отдельных ассоциированных элементов — полиэдрических кластеров общей формулы $(\text{H}_2\text{O})_n$, где $n = 3, \dots, 21$, в которых молекулы связаны Ван-дер-Ваальсовыми, диполь-дипольными и другими силами и взаимодействиями с переносом заряда, включая водородную Н...О-связь. Отличительной особенностью водородной связи является сравнительно низкая прочность; она в 5...10 раз слабее химической ковалентной связи [17, 18]. По энергии водородная связь занимает промежуточное положение между химической связью и Ван-дер-Ваальсовыми взаимодействиями, удерживающими молекулы в твердой или жидкой фазе. Энергия водородной связи составляет 5...10 ккал/моль, в то время как энергия ковалентной О—Н-связи в воде — 109 ккал/моль. В то же время энергия ковалентной О—Н-связи в 200 раз больше тепловой энергии. Поэтому водородные связи в жидком состоянии относительно слабы и неустойчивы: предполагается, что они могут легко возникать и разрушаться в результате тепловых флуктуаций.

Изменение положения одного структурного элемента (молекулы воды) под действием любого внешнего фактора или изменения ориентации окружающих соседних молекул воды обеспечивает высокую чувствительность структурных элементов воды к различным внешним воздействиям (электромагнитные, тепловые, звуковые поля, биовоздействие и др.). Молекулы воды в жидком состоянии в нормальных условиях (1 атм, 22 °С) способны совершать колебательные движения, вращения вокруг своей оси, а также хаотические и направленные перемещения, за счет чего отдельные молекулы могут "перескакивать" из одного места в другое в объеме воды за счет кооперативных взаимодействий. В результате в водных растворах возможен аутопротолиз, т. е. отрыв протона H^+ от одной молекулы воды с последующим перемещением и присоединением H^+ к соседней молекуле H_2O , приводящие к делокализации протона в пределах кластера с образованием ионов гидроксония состава: H_3O^+ , H_5O_2^+ , H_7O_3^+ , H_9O_4^+ и др. Это свойство объясняет чрезвычайно лабильный, подвижный характер взаимодействия ассоциатов друг с другом.

В математической модели воды предполагается, что вода, состоящая из множества ассоциативных элементов — нейтральных кластеров $(\text{H}_2\text{O})_n$ и заряженных кластерных ионов $[(\text{H}_2\text{O})_n]^+$ и $[(\text{H}_2\text{O})_n]^-$ различных типов — способна образовывать подобие иерархической пространственной квазикристаллической структуры, где n в математических

расчетах может достигать десятков и даже сотен единиц. Это свойство объясняет чрезвычайно лабильный, подвижный характер взаимодействия ассоциативных элементов воды друг с другом. Природа этого феномена обусловлена дальними кулоновскими силами, определяющими особый вид зарядово-комплементарной связи, за счет которой осуществляется построение структурных элементов воды в ячейки (клатраты) размером до 0,5...1,0 мкм [19].

Молекулы воды являются полярными диполями и ориентируются упорядоченно при воздействии внешнего электрического поля. При исследовании Кирлиан-спектра водных капель было обнаружено, что электрическое свечение связано с полярностью водных молекул и их ориентацией под воздействием внешнего электрического поля.

Поляризация — явление, связанное с электромагнитными волнами, когда электромагнитное поле осциллирует (колеблется) в одной определенной плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. У воды высокая диэлектрическая проницаемость, и это важно для ее свойств как растворителя. Кирлиановые фотографии капель воды различного происхождения и степени водоочистки указывают на то, что разная вода по-разному взаимодействует с электрическим полем. Кроме этого, вода является источником сверхслабого и слабого переменного электромагнитного излучения. В этом случае возможна индукция соответствующего электромагнитного поля и резонансные эффекты совмещения (суперпозиции) электромагнитных полей, способных изменять структурно-функциональные характеристики биологических объектов, на 70...80 % состоящих из воды. Воздействие на воду высокочастотного электрического разряда возможно детектировать методом кирлианографии в виде характерного газоразрядного свечения вокруг капли воды. С физической точки зрения этот процесс характеризуется как процесс неравновесного переноса электрического разряда в примыкающем к объекту исследования ионизированном электрическом поле воздухе. Как показали наши исследования, на характер ГРВ-свечения капель воды в переменном электрическом поле высокого напряжения и высокой частоты оказывает влияние вид воды, способ и уровень водообработки и водоочистки, наличие в воде примесей и другие факторы.

Метод цветного Кирлиан-анализа хорошо зарекомендовал себя в комбинации с другими физическими методами исследования структурных свойств воды, одним из которых являются неравновесный энергетический спектральный (НЭС) и дифференциальный неравновесный энергетический спектральный (ДНЭС) анализы. Физическая сущность

этих методов заключается в том, что при испарении капли воды угол смачивания θ уменьшается дискретно до нуля, причем диаметр капли изменяется незначительно [20]. Путем измерений этого угла через равные интервалы времени определяется функциональная зависимость $f(\theta)$, которая обозначается энергетическим спектром состояния воды. Для практических целей за счет измерения энергетического спектра состояния воды возможно получить информацию об усредненном значении энергии водородных связей между индивидуальными молекулами H_2O в пробе воды и по нему судить о структурных изменениях в воде. В расчетах используется модель, рассматривающая воду как ассоциированную жидкость, состоящую из $\text{O}-\text{H}\dots\text{O}-\text{H}$ групп [21]. Большая часть этих групп определяется энергией водородных связей ($-E$), а остальные группы свободны ($E = 0$). Функция распределения молекул воды по энергиям $f(E)$ измеряется в электронвольтах (эВ^{-1}) и может изменяться под воздействием различных внешних воздействий на воду.

Для практических расчетов функции $f(E)$ используется экспериментальная зависимость между поверхностным натяжением воды (θ) и энергией водородных связей между ее молекулами (E):

$$f(E) = \frac{14,33f(\theta)}{[1 - (1 + bE)^2]^2},$$

где $b = 14,33 \text{ эВ}^{-1}$.

Соотношение между углом смачивания θ и энергией водородных связей между ее молекулами E рассчитывается по формуле

$$\alpha = \arccos(-1 - 14,33E).$$

Энергия водородных связей E измеряется в электронвольтах (эВ) и определяется спектром распределения по энергиям. Спектр воды характеризуется неравновесным процессом испарения капель воды, поэтому используется термин "неравновесный энергетический спектр воды" (НЭС).

Разница $\Delta f(E) = f$ (пробы воды) $- f$ (контрольной пробы воды) обозначается "дифференциальный неравновесный энергетический спектр воды" (ДНЭС).

ДНЭС является мерой изменений структуры воды в результате внешних воздействий. Совокуп-

ное влияние всех остальных факторов одинаково для контрольной пробы воды и пробы воды, на которую оказывается данное воздействие.

Методом ДНЭС в комбинации с Фурье-ИК спектроскопией были измерены значения средней энергии ($\Delta E_{\text{H}\dots\text{O}}$) водородных $\text{H}\dots\text{O}$ -связей между молекулами H_2O в процессе формирования кластерных ассоциатов формулы $(\text{H}_2\text{O})_n$, составляющие $-0,1067 \pm 0,0011 \text{ эВ}$, что совпадает с основным пиком в дифференциальном неравновесном энергетическом спектре анализируемого образца воды (рис. 4). При изменении температуры воды средняя энергия водородных $\text{H}\dots\text{O}$ связей в ассоциатах молекул H_2O изменяется. Проведенный анализ образцов воды методом ДНЭС показал процесс ориентации (структурирования) молекул воды в результате поляризации водных кластеров, что видно из ДНЭС-спектра воды (рис. 4). Верхняя часть ДНЭС-спектра показывает "окно прозрачности" земной атмосферы для электромагнитного излучения в среднем ИК диапазоне.

Структурированное состояние воды оказалось чувствительным датчиком различных полей и воздействий — электромагнитных, акустических, энер-

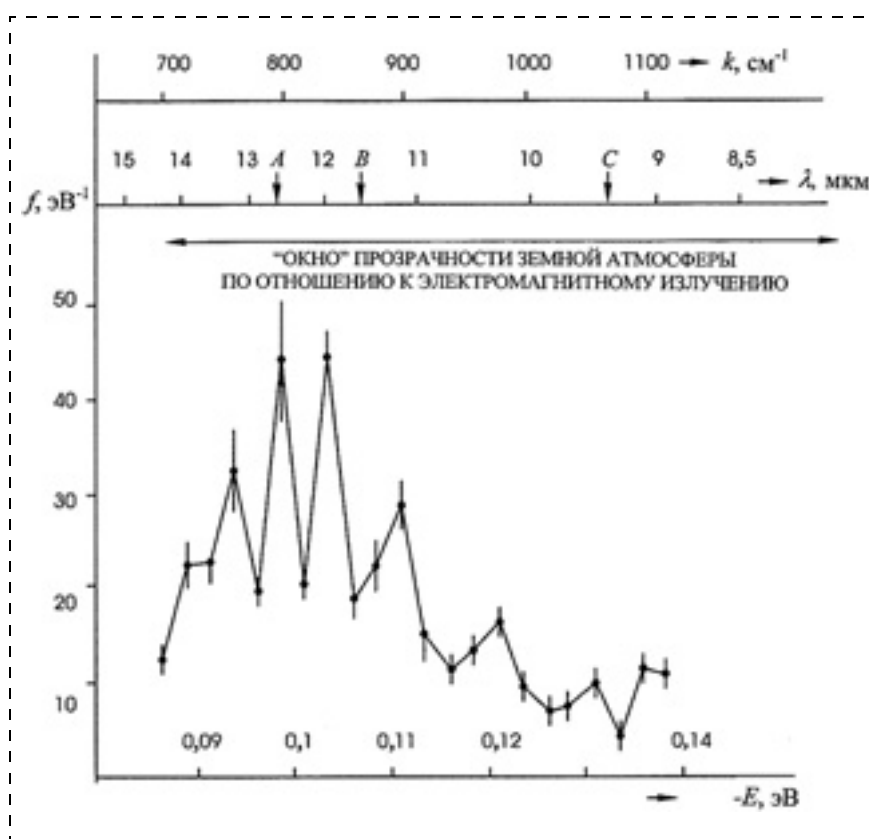


Рис. 4. Дифференциальный неравновесный энергетический спектр (ДНЭС) контрольного образца воды (хим. чистота 99,9 %, $\text{pH} = 6,5 \dots 7,5$, общая минерализация — 400 мг/л, удельная электропроводность — 10 $\text{мк} \cdot \text{См/см}$). По оси абсцисс показана энергия водородных $\text{H}\dots\text{O}$ связей в ассоциатах молекул H_2O — E (эВ), по оси ординат — функция распределения по энергиям f (эВ^{-1}); k — пространственная частота (волновое число) (см^{-1}); λ — длина волны (мкм)

гоинформационных и др. Кроме этого, вода является источником сверхслабого и слабого переменного электромагнитного излучения. В этом случае возможна индукция соответствующего электромагнитного поля и резонансные эффекты совмещения (суперпозиции) электромагнитных полей, способных изменять структурно-функциональные характеристики биологических объектов, на 70...80 % состоящих из воды. Как показали исследования, на характер ГРВ-свечения капель воды в переменном электрическом поле высокой частоты оказывает влияние тип воды, способ и уровень водообработки и водоочистки, наличие в воде примесей и другие факторы.

Авторы считают, что воздействия на воду факторов различной природы — электромагнитных, акустических полей, биовоздействий и др., оказывая определенное направленное воздействие на воду, изменяют посредством изменения водородных связей между молекулами воды структуру водных ассоциатов так, что в них кодируется информация об этих воздействиях, которую можно детектировать в том числе методом цветного спектрального Кирлиан-анализа и методом ГРВ. Современные технологии цветного спектрального Кирлиан-анализа и метод ГРВ позволяют детектировать эту информацию в виде характерного газоразрядного свечения капель воды в переменном поле высокой напряженности и частоты. С физической точки зрения ГРВ-свечение воды характеризуется как процесс переноса электрического разряда в прилегающем к объекту исследования ионизированном воздухе. Авторы считают, что возникновение ГРВ-свечения вокруг капли воды может быть объяснено с учетом энергии электрического поля и изменения за счет воздействия электрического поля структуры воды, которая, в свою очередь, может быть обусловлена межмолекулярными перестройками внутри водных ассоциатов. Этот факт может свидетельствовать о том, что вода обладает информационными свойствами.

В настоящее время проводятся модификации метода цветного спектрального Кирлиан-анализа и программного обеспечения для его реализации, что дает авторам основание надеяться, что данный метод визуализации получит новый этап своего развития в медицинской диагностике.

Заключение

В результате работы получены и проанализированы 2500 цветных Кирлиан-снимков пальцев рук больных заболеваниями опорно-двигательного аппарата (остеоартроз, ревматоидный артрит, заболевания позвоночника) и образцов воды различного происхождения и степени водообработки. С на-

учной точки зрения, данные исследования могут служить основой для понимания происхождения и функционирования различных биоэлектрических процессов в организме человека при их взаимодействии с внешним электрическим полем, что может служить индикатором различных заболеваний и патологий. С технологической точки зрения разработана научно-материальная база для совершенствования новых методов ГРВ-диагностики и цветного Кирлиан-анализа, заключающихся в использовании метода селективного высокочастотного разряда (СВЧР) на электроде из ПЭТФ и хостафана с электрической прочностью 160...200 кВ/мм, плотностью 1,38...1,4 г/см³, температурой плавления 260 °С. Полученные данные цветного спектрального Кирлиан-анализа и ГРВ-диагностики могут использоваться совместно с традиционными методами клинической диагностики.

Список литературы

1. Авт. свид. СССР № 106401. Метод фотографирования объектов в высокочастотном электрическом разряде. С. Д. Кирлиан. 1949.
2. Иванов Э. В., Журавлёв А. И. О свечении биологических объектов в импульсном высоковольтном разряде. Сверхслабые свечения в биологии. М.: Медицина, 1972. 109 с.
3. Коротков К. Г., Ратман П. А., Гоголадзе Г. И. Экспериментальная установка для исследования применения метода поверхностной газоразрядной визуализации (эффект Кирлиан) // Известия ЛЭТИ. 1991. № 428. С. 83—88.
4. Adamenko V. G. Objects moved at a distance by means of a controlled bioelectric field // International Congress of Psychology, Tokyo: Elsevier, 1972, 54 с.
5. Antonov A. N., Yuskeselieva L. I. Research of Electrical Discharge of Biological Objects, Moscow: Signal AM, 1979. 54 p.
6. Коротков К. Г. Эффект Кирлиан. СПб.: Изд. "Ольга", 1994. 47 с.
7. Гурвиц Б. Я., Крылов Б. А., Коротков К. Г. Использование метода ГРВ для разработки нового подхода к ранней диагностике онкологических заболеваний. "Биомедприбор-98" // Тез. докл. межд. конф. М., 1998. С. 106—107.
8. Коротков К. Г., Малышев В. Э. Экспресс-диагностика физического и психологического состояния человека с помощью метода газоразрядной визуализации // Матер. научно-практич. конф. "Экология, здоровье, безопасность". СПб.: Наука, 1998. 52 с.
9. Korotkov K. C., Krizhanovsky E. V. The dynamic of the Gas Discharge around drops of liquids. Measuring Energy Fields: State of the Science. New York: Backbone Publ. Co., USA, 2004, 123 p.
10. Antonov A., Yuskeselieva L. Selective High Frequency Discharge (Kirlian effect) // Acta Hydrophysica. 1985. V. 3. P. 29—30.
11. Ignatov I., Mosin O. V., Niggli H., Drossinakis Ch. Evaluating of possible methods and approaches for registering of electromagnetic waves emitted from human body // Advances in Physics Theories and Applications. 2014. V. 30. P. 15—33.
12. Korotkov K. G., Kaariainen P. GDV applied for the study of a physical stress in sportsmens // Journal of Pathophysiology. 1998. V. 5. P. 53—57.

13. **Ignatov I., Marinov M.** Color Kirlian Spectral Analysis. Color Observation with Visual Analyzer. Hanover: Euromedica, 2008. 96 p.
14. **Zellner A.** Energy, Color Kirlian Analysis of Ignat Ignatov // Die Ingenieurin. 2009. N. 89. P. 23–29.
15. **Ignatov I.** Energy Biomedicine, Biophysical and Medical Effects in Cases of Bioresonance of Biophysical Fields. Sofia: Gea Libris, 2005. 112 p.
16. **Игнатов И., Мосин О. В.** Эффект Кирлиан в изучении свойств биологических объектов и воды // Биомедицинская радиоэлектроника. Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2012. № 12. С. 13–21.

17. **Мосин О. В., Игнатов И. И.** Структура воды и физическая реальность // Сознание и физическая реальность. 2011. Т. 16, N. 9. С. 16–31.
18. **Мосин О. В., Игнатов И.** Структура воды // Химия. 2011. № 11. С. 24–27.
19. **Игнатов И., Мосин О. В.** Математические модели, описывающие структуру воды и нанокластеры // Нанотехнология. 2013. Т. 8, № 26. С. 26–38.
20. **Ignatov I., Mosin O. V.** Structural mathematical models describing water clusters // Journal of Mathematical Theory and Modeling. 2013. V. 3, N. 11. P. 72–87.
21. **Ignatov I., Mosin O. V., Naneva K.** Water in the Human Body is Information Bearer about Longevity. Hanover: Euro-medica, 2012.

I. Ignatov, Doctor of European Academy of Natural Sciences (Hannover, Germany), Professor, Director of Scientific Research Center of Medical Biophysics, Sofia, Bulgaria, e-mail: mbioph@dir.bg,
O. V. Mosin, Research Associate, e-mail: mosin-oleg@yandex.ru, Moscow State university of applied biotechnology, Russia

Kirlian Effect in Studying of Gas Discharge Glow of Biological Objects and Water by the Method of Color Kirlian Analysis

In present paper are submitted data about applying of effect of electric luminescence of objects of the various nature in variable electric fields of high electric intensity and frequency (Kirlian effect) in biomedical studying of bioelectrical properties of biological objects and water. There are received and analyzed electric luminescence pictures of human hand fingers and water samples of various origin and degree of water purification. By a combination of methods of color Kirlian analysis and differential nonequilibrium energy spectrum (DNES) were analyzed the structural properties of water. It was measured the average energy of hydrogen bonds between H_2O molecules in the process of cluster formation (dimer, trimer) compiles $-0,1067 \pm 0,0011$ eV.

Keywords: Kirlian effect, gas discharge visualization, DNES, water

References

1. **Avt. svid.** USSR N. 106401. *Metod fotografirovaniya obek-tov v vysokochastotnom elektricheskom razryade*. S. D. Kirlian. 1949.
2. **Ivanov E. V., Zhuravlyov A. I.** *O svechenii biologicheskix obektov v impulsnom vysokovoltnom razryade. Sverxslabye svecheniya v biologii*. M.: Medicina, 1972. 109 p.
3. **Korotkov K. G., Ratman P. A., Gogoladze G. I.** Eksperimentalnaya ustanovka dlya issledovaniya primeneniya metoda poverkhnostnoj gazorazryadnoj vizualizacii (effekt kirlian). *Izvestiya LETI*. 1991. N. 428. P. 83–88.
4. **Adamenko V. G.** Objects moved at a distance by means of a controlled bioelectric field. *International Congress of Psychology*, Tokyo: Elsevier, 1972. 54 p.
5. **Antonov A. N., Yuskeseleva L. I.** *Research of Electrical Discharge of Biological Objects*, Moscow: Signal AM, 1979. 54 p.
6. **Korotkov K. G.** *Effekt Kirlian*. SPB.: Izd. "Olga", 1994. 47 p.
7. **Gurvic B. Ya., Krylov B. A., Korotkov K. G.** *Ispol-zovanie metoda grv dlya razrabotki novogo podxoda k rannej di-agnostike onkologicheskix zabolevanij. "Biomedpribor-98"*. Tez. dokl. mezhd. konf. 1998. P. 106–107.
8. **Korotkov K. G., Malyshev V. E.** *Ekspress-diagnostika fizicheskogo i psixologicheskogo sostoyaniya cheloveka s po-moshhyu metoda gazorazryadnoj vizualizacii. Mater. nauch-no-praktich. konf. "Ekologiya, zdorove, bezopasnost"*. SPB.: Nauka, 1998. 52 p.
9. **Korotkov K. G., Krizhanovsky E. V.** *The dynamic of the Gas Discharge around drops of liquids. Measuring Energy Fields: State of the Science*. New York: Backbone Publ. Co., USA, 2004, 123 p.
10. **Antonov A., Yuskeseleva L.** Selective High Frequency Discharge (Kirlian effect). *Acta Hydrophysica*. 1985. V. 3. P. 29–30.
11. **Ignatov I., Mosin O. V., Niggli H., Drossinakis Ch.** Evaluating of possible methods and approaches for registering of electromagnetic waves emitted from human body. *Advances in Physics Theories and Applications*. 2014. V. 30. P. 15–33.
12. **Korotkov K. G., Kaariainen P.** GDV applied for the study of a physical stress in sportsmens. *Journal of Pathophy-siology*. 1998. V. 5. P. 53–57.
13. **Ignatov I., Marinov M.** *Color Kirlian Spectral Analysis. Color Observation with Visual Analyzer*. Hanover: Euromedica, 2008. 96 p.
14. **Zellner A.** Energy, Color Kirlian Analysis of Ignat Ignatov. *Die Ingenieurin*. 2009. N. 89. P. 23–29.
15. **Ignatov I.** *Energy Biomedicine, Biophysical and Medical Effects in Cases of Bioresonance of Biophysical Fields*. Sofia: Gea Libris, 2005. 112 p.
16. **Ignatov I., Mosin O. V.** Effekt kirlian v izuchenii svoystv biologicheskix obektov i vody. *Biomedicinskaya radioelektroni-ka, biomedicinskie texnologii i radioelektronika*. 2012. N. 12. P. 13–21.
17. **Mosin O. V., Ignatov I. I.** Структура воды и физическая реальность. *Soznanie i fizicheskaya realnost*. 2011. V. 16, N. 9. P. 16–31.
18. **Mosin O. V., Ignatov I.** Структура воды. *Chimiya*. 2011. N. 11. P. 24–27.
19. **Ignatov I., Mosin O. V.** Математические модели, opis-yvayushhie strukturu vody i nanoklastery. *Nanoinzheneriya*. 2013. V. 8, N. 26. P. 26–38.
20. **Ignatov I., Mosin O. V.** Structural mathematical models describing water clusters. *Journal of Mathematical Theory and Modeling*. 2013. V. 3, N. 11. P. 72–87.
21. **Ignatov I., Mosin O. V., Naneva K.** *Water in the Human Body is Information Bearer about Longevity*. Hanover: Euro-medica, 2012.

КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ, ВЫСТАВКИ

CONFERENCES, SEMINARS, EXHIBITIONS

УДК 623.3

Л. С. Раткин, канд. техн. наук, заместитель генерального директора ООО "АРГМ", г. Москва
e-mail: rathkeen@bk.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ: ОТ КВАНТОВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ — К КОМПЬЮТЕРНОЙ СТЕГАНОГРАФИИ

Поступила в редакцию 11.10.2014

Экономические санкции, введенные в 2014 году по отношению к России со стороны ряда стран, стимулируют рост импортозамещающих разработок, в том числе в высокотехнологичной сфере. Одним из ключевых направлений импортозамещения является квантовая электроника. Оптимальное сочетание нанотехнологий и информационных технологий позволяет повысить эффективность функционирования академических институтов и предприятий и организаций оборонно-промышленного комплекса в сфере фундаментальных и прикладных научных исследований.

Ключевые слова: Российская академия наук (РАН), квантовая электроника, компьютерная стеганография, микроэлектроника, нанoeлектроника, импортозамещение

Согласно данным открытых информационных источников, в начале 2014 года стало известно о работах в Агентстве национальной безопасности США по созданию квантового компьютера для взлома современных криптосистем с открытым ключом, применяемых для защиты сайтов и документов, содержащих государственную тайну [1]. Объем финансирования исследовательской программы составляет 79,7 млн долл. Компания *D-Wave Systems* в 2012 году продала квантовую ЭВМ поисковой системе Google, Университетской ассоциации космических исследований и NASA. Ранее, в мае 2013 года, компания Google анонсировала лабораторию квантовых исследований в сфере искусственного интеллекта, организованную на базе Исследовательского центра Эймса NASA в Калифорнии. Цель исследователей состоит в изучении возможностей квантовых вычислений для выполнения задач по машинному обучению. Для вычислений приобретен квантовый компьютер канадской фирмы *D-Wave Systems* модели "D-Wave Two", процессор которой работает с 512 кубитами (квантовыми битами). Заключению сделки предшествовали испытания, по результатам которых было подтверждено, что квантовый компьютер решает ряд классов задач, на которые он ориентирован, в 3600 раз быстрее современной ЭВМ. Для сравнения: при переборе паролей на квантовом компьютере для взлома он за 1 с выполняет приблизительно столько же операций, сколько обычная современная ЭВМ — за 1 ч ($60 \times 60 = 3600$)! Другая аналогия: если при защите данных применен очень длинный пароль, взлом которого по оценкам экспертов составит 60 лет, то квантовый компьютер его откроет менее, чем за неделю!

Повышение на три порядка скорости работы квантовых компьютеров по сравнению с обычными (и это далеко не предел) меняет принципы обеспече-

ния информационной безопасности на государственном уровне. Отметим, что в 2009 году были проведены успешные испытания квантового компьютера всего на двух кубитах, распознающего на цифровых фото автомобили. Канадская компания *D-Wave Systems* также продала квантовый компьютер одной из ведущих корпораций американского ВПК *Lockheed Martin* [2].

Параллельно с разработкой квантовых компьютеров за рубежом проводятся исследования в сфере квантовой криптографии [3]. Например, в Великобритании учеными открыт способ создания сетей связи с применением квантово-криптографических технологий. В основе решения — принципиально новый метод информационной защиты: в системе связи данные транслируются с помощью отдельных фотонов, что позволяет определить наличие постороннего приемника информации (при наблюдении за частицами света меняется их структура, что свидетельствует о вторжении в канал связи). С помощью приложения передается "невзламываемый" код (*quantum key distribution*, QKD). Помимо двойных, у квантовых технологий масса гражданских приложений: например, компанией Apple подана заявка на патент дисплея для мобильных устройств (в том числе iPad, iPhone) с вкраплением нанокристаллических квантовых точек, состоящих из полупроводниковых материалов, что позволяет получать с высокой степенью точности оттенки различных цветов [4].

Как в этой сфере исследований обстоят дела в России? 8 января 2014 года на сайте Правительства РФ был опубликован документ "Об утверждении новой редакции плана мероприятий ("дорожной карты") "Развитие отрасли информационных технологий" [5]. Распоряжение от 30 декабря 2013 г. № 2602-р разработано "с учетом основных положений "Стратегии развития отрасли информационных технологий в

Российской Федерации на 2014—2020 годы и на перспективу до 2025 года", утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 1 ноября 2013 года № 2036-р". В план включены «мероприятия, направленные на проведение комплекса исследований в целях создания отечественных технологий вычислений в облачной и суперкомпьютерной среде и технологий для развития российских суперкомпьютеров, а также использование инфраструктуры и операционных возможностей инновационного центра "Сколково"».

В соответствии с документом планируется не только "поддержать средний темп роста отрасли информационных технологий на уровне, значительно превышающем средний темп роста валового внутреннего продукта (не менее, чем в 3 раза за весь период), но и "удвоить к 2018 году количество высокотехнологичных рабочих мест в указанной отрасли (всего более 600 тыс. рабочих мест), увеличить производство российской продукции в отрасли информационных технологий с 270 млрд руб. до 450 млрд руб., а также содействовать снижению зависимости страны от сырьевого экспорта (путем удвоения к 2018 году экспорта продукции и услуг) и повышению производительности труда в экономике России за счет ускоренного внедрения информационных технологий в другие отрасли экономики". Представлены важные задачи и достойные цели, но... при просмотре документа в нем ни разу (!) не упоминаются квантовые компьютеры и квантовые вычисления. Неужели это направление не относится к числу приоритетных? Разве в России аналогичные разработки не проводятся? Есть ряд ведущих отечественных отраслевых институтов Российской академии наук, давно и успешно проводящих исследования по этой проблематике, но неупоминание "квантовой тематики" в новой редакции плана мероприятий "Развитие отрасли информационных технологий" — это не только игнорирование очевидной угрозы информационной безопасности России, но и предпосылка к исключению академических институтов, проводящих эти исследования, из списка стратегически важных! В условиях переподчинения ФАНО РФ тысячи академических организаций необходима фиксация их конкретной тематики в ключевых отраслевых документах, регулирующих развитие промышленности.

Автор в течение ряда лет выступал с докладами и принимал участие в конференциях, на которых рассматривались вопросы разработки квантовых компьютеров. Одной из наиболее представительных является конференция "Микро- и нанoeлектроника", проводимая Российской академией наук совместно с Российским фондом фундаментальных исследований, ФТИАН и рядом других организаций. Например, конференция прошлого года открылась серией презентаций высокотехнологичных компаний. Технологическое оборудование для нанoeлектроники фирмы *SemiTEq* рассматривалось в докладе А. Алексева, примеры проведения структурной диагностики, элементарного и характеристического анализа современных микро- и наносистем с применением инструментов SEM/FIB — в выступлении И. Ануфриева. Атомно-силовая микроскопия сверхвысокого разреше-

ния была темой презентации М. Минина из компании INTERTECH Corp., оборудованию "Oxford Instruments Plasma Technology" для микро- и нанoeинженерии материалов полупроводников, оптоэлектроники, МЭМС и других приложений было посвящено сообщение К. Куваева из компании *Technoinfo Limited*. Сессия презентаций завершилась представлением И. Брехиным (*Technoinfo Limited*) новых систем для нано- и микроэлектронных приложений компании *FEI*.

Пленарная сессия 1 включала доклады В. Бьюркова (ФТИАН) по новым материалам и будущим структурам генерации ULSI, Ф. Балестра (Институт Синано, ИМЕП-Минатек, CNRS-Гренобль INP, UJF, Франция) по новым приборам и материалам для операций со сверхнизкими энергиями, А. Хикавии с соавторами (ИМЕС, Леувен, Бельгия) по селективному эпитаксиальному росту и приложениям в перспективных MOS-приборах SiGe и Ge, Т. Охба (Институт инжиниринговых инноваций, Высшая школа инжиниринга, Университет Токио) по технологиям соединения для трехмерной интеграции.

На пленарной сессии 2 были рассмотрены вопросы развития квантовой информатики. Е. Ильичев представил доклад научного коллектива из Института фотонных технологий (Йена, ФРГ), Департамента экспериментальной физики (Университет "Комениус", Братислава, Словакия) и Исследовательских лабораторий по нанoeлектронике NEC (Цукуба, Ибараку, Япония) по усилителям для суперпроводящего кубита. Э. Фельдман совместно с коллегами из Института проблем химической физики РАН (Черноголовка) выступил с докладом по квантовым корреляциям простейших физических систем. Ф. Аблаев (Институт информатики Академии наук Республики Татарстан и Казанский федеральный университет) сфокусировал внимание слушателей на специальных алгоритмах для квантовых программ. Ю. Богданов совместно с коллективом сотрудников из ФТИАН, Математического института им. В. А. Стеклова РАН и Национального исследовательского университета электронной техники "МИЭТ" представил доклад по математическому моделированию квантового шума и качеству компонентов аппаратного обеспечения квантовых компьютеров.

Пленарная сессия 3 открылась выступлением В. Рыжего, представляющего научный коллектив сотрудников Университета Тохoku (Сендай, Япония), Университета Айзу (Айзу-Вакамацу, Япония), Университета Буффало (SUNY, Буффало, США) и Политехнического института Ренсселау (Трой, США) по концепции, свойствам и сравнению инфракрасных терагерцовых детекторов на базе графена. Доклад Т. Отсуи и его коллег из Исследовательского института электронных коммуникаций Университета Тохoku (Сендай, Япония) и Нанoeлектронной лаборатории Университета Айзу (Япония) касался создания графеновых лазеров терагерцового поколения. В завершающем выступлении пленарной сессии 3 (и всех пленарных сессий конференции) Ф. Лакопи и ее коллег из Лабораторий микро- и нанотехнологий Университета Гриффита (Австралия) рассматривались перспективные приложения 3C—SiC на кремниевой технологии.

В завершение краткого обзора конференции важно отметить, что помимо трех пленарных сессий, в ее рамках было организовано и проведено 21 секционное заседание: одно — по метрологии и характеристике; одно — по микроэлектромеханическим и наномеханическим системам (МЭМС и НЭМС); одно — по суперпроводимости (структурам и приборам); одно — по передовым технологиям литографии; одно — по магнитным нано- и микроструктурам; два — по моделированию процессов и технологий; два — по технологиям "кремний на изоляторе"; два — по микро- и наноприборам; два — по плазме и ионной имплантации; два — по микро- и наномеханическим структурам; шесть — по квантовой информатике.

Из общего числа заседаний 24 только семь (шесть секционных и одно пленарное), т. е. 29 %, было посвящено вопросам квантовой информатики! Ввиду большого числа докладчиков и представляемых ими организаций укажем только темы их докладов.

1. Квантовые корреляции, квантово-фазовый переход и магнитно-тороидальное состояние в антиферромагнетиках XXZ (спин $S = 1/2$ в неомогенном магнитном поле).

2. Квантовые и классические корреляции в высокотемпературной динамике для двухспиновой модели.

3. Квантовый компьютер многоатомной сборки в квантовой электродинамической среде.

4. Квантовая адресация в квантовой памяти случайного доступа с фотонным эхо.

5. Двухфотонная структура и термический свет.

6. Бифотонный спектральный контроль.

7. Эффект квантования, наблюдаемый в асимметричных кольцах.

8. Квантовые коммуникации и конденсат Бозе—Энштейна.

9. Эффект загрузки образа при эволюции кубита.

10. Квантовая информация и спектроскопия "холодных" атомов Ридберга.

11. Создание одноатомного массива для квантовых операций с применением блокады Ридберга в атомном ансамбле.

12. Интегрированные diamond-наноструктуры для квантовой информатики.

13. Цветовые центры в наномалмазах различного происхождения.

14. Квантовый регистр на структурированном алмазном волноводе с NV-центрами.

15. Накачка с приборами блокады Колумба.

16. Квантовая рассогласованность в материалах с электронным и ядерным спинами.

17. Реализация оптимального по времени квантового преобразования Фурье для кубитов квадрупольного ядра.

18. Спиновая цепочка в условиях квантового канала данных.

19. Унитарное инвариантное измерение квантовых корреляций.

20. Квантовые корреляции в нанопорах, заполненных газом спин-переносящих молекул (атомов) в сильном магнитном поле.

21. Квантовая запутанность системы гармонических осцилляторов.

22. Сила влияния слабых наблюдателей на динамику электронов в больших кластерах, связанных квантовыми точками.

23. Анализ квантовых процессов: методы и результаты.

24. Запутанность—аннигиляция квантовых динамических процессов.

25. Евклидовы кубиты и обычные квантовые схемы: за и против.

26. О действии неклассической теории эффекта Комптона для ревизии и переформулирования стандартных квантовых механических интерпретаций.

27. Почему квантовые вычисления реальны только в множественных вселенных.

28. Моделирование адиабатических и неадиабатических химических реакций в конденсированных средах.

29. Квантовый подтекст и стратегии мультиагентных моделей.

На многих конференциях по квантовым вычислениям авторы докладов, участники сессий и гости задавали один важный вопрос: что, помимо повышения скорости вычислений, даст человечеству появление и повсеместное распространение квантовых компьютеров? Ответ очевиден: промышленное производство квантовых компьютеров приведет к смене парадигмы информационной безопасности! Большинство существующих систем связи и телекоммуникационных комплексов, вычислительных кластеров и хранилищ данных окажутся беззащитными под "суперкомпьютерной мощью". Существующие системы шифрования данных (например, квантовой криптографии) потребуют существенной доработки и интеграции механизмов, замедляющих доступ к персональной информации на подавляющем большинстве носителей. Что же может быть предоставлено в качестве неотъемлемого дополнения для защиты данных при использовании квантовых компьютеров?

Работая в течение семи лет системным администратором на предприятии ОПК РФ, автор искал технологию, способную существенно повысить уровень защиты данных, в том числе при использовании в качестве атакующей машины квантового компьютера (публикации на эту тему в начале 2000-х годов в открытой печати уже появились). Тогда же появились и первые печатные материалы по инновационному направлению компьютерной стеганографии. Работы по данному направлению вследствие недостатка финансирования на предприятии ОПК РФ к тому времени уже были давно закрыты, и продолжались исключительно за счет средств и энтузиазма автора. В 2005 г. была подана заявка в ФГУ "Федеральный институт промышленной собственности" (ФГУ "ФИПС") Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам на получение патента на изобретение без соавторов. Опыта подачи заявок автор тоже не имел (юридическая служба и бюро патентования на предприятии ОПК уже тоже давно не функционировали), как и средств на оплату подачи заявки через фирму с заказом оформления всего необходимого пакета документов, поэтому изобретателю пришлось пройти "с нуля" весь процесс получения патента. После переписки с ФГУ "ФИПС" был получен отчет о поиске, согласно которому ана-

логом разработки, согласно данным ведущего отраслевого экспертного института, на момент подачи заявки (2005 год) было признано всего шесть (!) изделий, из них четыре — зарубежные разработки, в том числе одна продукция — *Sun Microsystems* и две — *Microsoft Corporation*. У всех шести аналогов категория ссылочных документов "А" соответствовала общему уровню техники и не считающемуся особо релевантным. На основании экспертной проверки российской и зарубежных баз данных ФГУ "ФИПС" было принято решение о выдаче патента на изобретение, разработанное автором. При детальном ознакомлении с продукцией конкурентов выяснилось, что применяемые ими технологии позволяют не только защищать информацию, но и получать к ней скрытый (в "стеганографическом" смысле) доступ к защищенным данным. Например, зарубежное программное обеспечение, эксплуатируемое на российских оборонных предприятиях, при работе в ряде режимов действовало в режиме ограниченной функциональности по сравнению с теми возможностями, которые оно могло реально предоставить своим разработчикам для доступа к данным пользователей. Вот эти режимы "скрытого" доступа и являлись примерами стеганографии, которая, как "обоюдоострое оружие", могла быть применена не только для нападения, но и для защиты. В разработанной авторской технологии, защищенной патентом на изобретение, детально представлен механизм защиты данных методом декомпозиции. Данная технология является импортозамещающей, поскольку замещает разработку иностранных компаний (в том числе *Sun Microsystems* и две — *Microsoft Corporation*).

Выводы

1. Выделение квантовой информатики в качестве одной из ключевых тем обсуждения на Международных конференциях подчеркивает всевозрастающую роль квантовых вычислений и квантовых компьютеров в современной промышленности. Их применение способно на несколько порядков повысить скорость решения традиционных вычислительных задач, например, по экспресс-моделированию проектирова-

ния средств микро- и наносистемной техники, технологий производства для наноиндустрии, реализованных в академических институтах и на предприятиях ОПК РФ.

2. Проблема "синхронного старта" частично решена в квантовом компьютере на 512 кубитах, запущенном в эксплуатацию в США в середине 2013 года. Его скорость вычислений на ряде тестовых задач в 3600 раз превосходит скорость современных компьютерных систем. Поскольку квантовые компьютеры эффективны, в частности при взломе систем защиты информационных комплексов, для обеспечения безопасности данных применимы импортозамещающие технологии компьютерной стеганографии [6].

3. В условиях экономических санкций, введенных в 2014 году по отношению к России со стороны ряда стран, в частности для разработчиков программного обеспечения (например, для производства микро- и наносистемной техники), необходимо увеличение финансирования НИОКР на предприятиях ОПК РФ по направлениям "квантовые компьютеры", "квантовые технологии" и "компьютерная стеганография". Также необходимо включение тематики "квантовые компьютеры", "квантовые технологии" и "компьютерная стеганография" в качестве дополнения в текст Распоряжения Правительства РФ от 30 декабря 2013 года № 2602-р "Об утверждении новой редакции плана мероприятий ("дорожной карты") "Развитие отрасли информационных технологий".

Список литературы

1. АНБ работает над созданием суперкомпьютера для взлома кодов. URL: <http://top.rbc.ru/society/03/01/2014/898037.shtml>.
2. Google покупает квантовый компьютер D-Wave. URL: <http://itc.ua/news/google-pokupaet-kvantovyyi-kompyuter-d-wave/>.
3. Квантовое шифрование данных обретает реальность. URL: http://soft.mail.ru/pressrl_page.php?id=53006.
4. Apple разрабатывает "квантовый" дисплей. URL: <http://www.cnews.ru/news/top/index.shtml&2013/12/23/554382>.
5. Распоряжение от 30 декабря 2013 года № 2602-р. Об утверждении новой редакции плана мероприятий ("дорожной карты") "Развитие отрасли информационных технологий". URL: <http://government.ru/docs/9576/>.
6. Раткин Л. С. Патент на изобретение № 2322693.

L. S. Rathkeen, Deputy Director, ARGM, e-mail: rathkeen@bk.ru

Modern Import Substitution Technologies: Form Quantum Nanoelectronics towards Computer Steganography

Economical sanctions (2014) from foreign countries to Russia stimulate the growth of import substitution, including high-tech industry. One of the key directions of import substitution is quantum electronics. The optimization of cooperation of nanotechnologies and information technologies may increase the efficiency of function between academician institutions and defensive enterprises in the field of basic and applied researching.

Keywords: Russian academy of sciences (RAS), quantum electronics, computer steganography, microelectronics, nanoelectronics, import substitution

References

1. АНБ работает над созданием суперкомпьютера для взлома кодов. URL: <http://top.rbc.ru/society/03/01/2014/898037.shtml>.
2. Google покупает квантовый компьютер D-Wave. URL: <http://itc.ua/news/google-pokupaet-kvantovyyi-kompyuter-d-wave/>.
3. Квантовое шифрование данных обретает реальность. URL: http://soft.mail.ru/pressrl_page.php?id=53006.

4. Apple разрабатывает "квантовый" дисплей. URL: <http://www.icnews.ru/news/top/index.shtml?2013/12/23/554382>.
5. Распоряжение от 30 декабря 2013 года № 2602-р. Об утверждении новой редакции плана мероприятий ("дорожной карты") "Развитие отрасли информационных технологий". URL: <http://government.ru/docs/9576/>.
6. Ratkin L. S. Patent na izobretenie № 2322693.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2014 г.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Раткин Л. С. К юбилею национального исследовательского центра "Курчатовский институт": новые разработки в сфере нано- и микросистемной техники № 2

Раткин Л. С. Синхротронные и нейтронные исследования наносистем № 1

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Александров П. А., Бударягин В. В., Жук В. И., Литвинов В. Л. Об отказоустойчивости нанoeлектронных интегральных схем при облучении № 1

Баркалин В. В., Чашинский А. С. Адсорбция водорода углеродными нанотрубками с учетом взаимодействия в адсорбированной фазе № 2

Воробьева А. И., Прищепа С. Л., Уткина Е. А., Комар О. М. Формирование и свойства никелевых наностолбиков в пористом оксиде алюминия № 1

Галушка В. В., Биленко Д. И., Терин Д. В. Исследование управляемого массопереноса в наноструктурах AgI—Ag методом туннельной микроскопии № 8

Глухова О. Е., Колесникова А. С., Слепченков М. М. Терагерцовый наноизлучатель на основе нанотрубки с инкапсулированными фуллеренами № 10

Самойлович М. И., Бовтун В., Белянин А. Ф., Кемпа М., Нужный Д., Клещева С. М., Савинов М. Диэлектрические свойства опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей оксидом цинка № 7

Шешин Е. П., Колодяжный А. Ю., Обедков А. М., Кетков С. Ю., Кремлев К. В., Каверин Б. С., Семенов Н. М. Исследование автоэмиссионных свойств массивов радиально-ориентированных многостенных углеродных нанотрубок № 10

Яхьяева Х. Ш., Козлов Г. В., Магомедов Г. М. Зависимость уровня межфазной адгезии от радиуса кольцеобразных структур углеродных нанотрубок (нановолокон) № 8

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Басаев А. С. Моделирование функционально-интегрированных структур на основе углеродных нанотрубок № 5

Амеличев В. В., Генералов С. С., Якухина А. В., Шаманаев С. В., Платонов В. В. Конструкция и технология изготовления матрицы силовых микроэлектромеханических ключей № 3

Артемова А. И., Михайлов Ю. А., Панков В. В., Суханов В. С. Оптимизация конструкции чувствительного элемента давления с распределенным жестким центром с помощью компьютерного трехмерного моделирования № 7

Афонин С. М. Решение волнового уравнения в задачах электромагнитоупругости для актюаторов нано- и микроперемещений № 2

Винокуров Д. Л. Численное моделирование магнитной структуры компенсированной границы раздела ферромагнетик — мультиферроик № 4

Вишнеков А. В., Ерохин В. В., Иванова Е. М. Автоматизация процедуры выбора микроконтроллера № 7

Галперин В. А., Разживин Н. А. Исследование процесса контролируемого плазменного сокращения размеров затвора № 6

Глухова О. Е., Колесникова А. С., Слепченков М. М., Шмыгин Д. С. Управление движением фосфолипидов во внешнем электрическом поле № 7

Гридин В. А., Васильев В. Ю., Чебанов М. А., Бялик А. Д., Чернов А. С. Численное моделирование элементов фотоэлектрического волоконно-оптического сенсора давления № 6

Деспотули А. Л., Андреева А. В. Ток смещения Максвелла и "универсальный" динамический отклик в наноионике № 5

Джаширов В. Э., Панкратов В. М., Голиков А. В. Математическое моделирование тепловых процессов в углеродных нанотрубках и фуллеренах № 11

Зенченко Н. В., Рубан О. А., Алешин А. Н., Глинский И. А., Мельников А. А. Моделирование нестационарных тепловых режимов НЕМТ-транзистора № 12

Игнатов И. И., Мосин О. В. Цветной коронный спектральный Кирлиан-анализ в моделировании неравновесных условий с газовым электрическим разрядом, имитирующих первичную атмосферу № 8

Макарцева М. М. Исследование эффективности использования специализированной библиотеки мажоритарных элементов при автоматизации проектирования № 11

Мальцев П. П., Матвеев О. С., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Крапухин Д. В., Зуев А. В., Бунегина С. Л. Монолитная интегральная схема усилителя со встроенной антенной для пяти-миллиметрового диапазона длин волн № 9

Маркелов А. С., Трушин В. Н., Чупрунов Е. В. Исследование возможности формирования пространственной структуры рентгеновских пучков с использованием легированных кристаллов № 4

Молодцова Г. В., Милованов Р. А., Зубов Д. Н., Кельм Е. А. Подходы к разделению кристаллов стековых сборок при анализе отказов многокристалльных интегральных схем № 7

Подгорный Ю. В., Воротилов К. А., Лавров П. П., Сигов А. С. Вольт-амперные характеристики пористых пленок ЦТС № 9

Пронин И. А., Аверин И. А., Димитров Д. Ц., Карманов А. А. Особенности структурообразования и модели синтеза наноконпозиционных материалов состава $\text{SiO}_2\text{—Me}_x\text{O}_y$, полученных с помощью золь-гель-технологии № 8

Пронин И. А., Аверин И. А., Мошников В. А., Якушова Н. Д., Кузнецова М. В., Карманов А. А. Перколяционная модель газового сенсора на основе полупроводниковых оксидных наноматериалов с иерархической структурой пор № 9

Росляков А. С. Исследование возможности создания низкочастотных СФ блоков для решения конечно-разностных уравнений в преобразованиях низкочастотных сигналов № 6

Сапогин В. Г., Прокопенко Н. Н., Марчук В. И., Манжула В. Г., Будяков А. С. Индуктивные свойства микроскопического кольца с плотностью вихревого тока азимутального направления № 1

Сеничкин А. П., Бугаев А. С., Ячменев А. Э. Исследование токовой неустойчивости в образцах, содержащих нанонити из атомов олова, встроенные в кристалл арсенида галлия № 3

Сеничкин А. П., Бугаев А. С., Ячменев А. Э. Оптимизация технологии получения рНЕМТ-структур на подложках GaAs с профилем легирования в виде нанонитей из атомов олова № 5

Сивченко А. С., Кузнецов Е. В. Методики анализа основных характеристик надежности в КМОП ИС с помощью тестовых структур в составе пластин № 6

Спиринов В. Г. Конструкция и технология многоуровневой платы с полимерной изоляцией № 7

Тимошенков С. П., Анчутин С. А., Плеханов В. Е., Кочурина Е. С., Тимошенков А. С., Зуев Е. В. Разработка математического описания кольцевого микрогирискапа № 5

Тимошенков С. П., Анчутин С. А., Рубчиц В. Г., Зарянкин Н. М., Виноградов А. И., Дернов И. С., Кочурина Е. С. Особенности проектирования и изготовления чувствительного элемента микромеханического акселерометра на КНИ-структурах № 7

Тютюгин А. В., Жукова С. А., Турков В. Е. Формирование проводящих микровыводов методом жидкостной химической обработки для сборки кристаллов методом "флип-чип" № 5

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Абдуллаев Д. А. Изменение набора применяемых материалов при уменьшении топологических норм производства интегральных микросхем № 5

Абдуллаев Д. А., Зайцев А. А., Кельм Е. А. Селективное плазмохимическое травление нитрида кремния относительно оксида кремния № 2

- Аверин И. А., Пронин И. А., Мошников В. А. Димитров Д. Ц., Якушова Н. Д., Карманов А. А., Кузнецова М. В. Анализ каталитических и адсорбционных свойств *d*-металлов-модификаторов диоксида олова № 7
- Амеличев В. В., Благов Е. В., Костюк Д. В., Васильев Д. В., Беляков П. А., Орлов Е. П., Абанин И. Е., Тахов В. С., Руковишников А. И., Россуканый Н. М. Магниторезистивная микросистема контроля электрического тока в проводнике . . . № 1
- Бабаевский П. Г., Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Гринькин Е. А., Турков В. Е., Резниченко Г. М., Рискин Д. Д., Бычкова Ю. А. Вакуумплотное матричное корпусирование сенсорных микроэлектромеханических систем (аналитический обзор). Часть 1. Процессы соединения и разрезания пластин, локальная герметизация (вакуумное капсулирование) чувствительных элементов сенсорных микроэлектромеханических систем . . № 3
- Бабаевский П. Г., Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Гринькин Е. А., Турков В. Е., Резниченко Г. М., Рискин Д. Д., Бычкова Ю. А. Вакуумплотное матричное корпусирование сенсорных микроэлектромеханических систем (аналитический обзор). Часть 2. Формирование вакуумплотных электрических выводов, способы сохранения и контроля вакуума в рабочих полостях и общие тенденции развития технологии корпусирования с МЭМС № 4
- Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Борисов В. В. Влияние термообработки углеродных пленок на характеристики автоэмиссионных катодов на их основе № 8
- Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Борисов В. В., Евлашин С. А. Исследование многофазных углеродных пленок автоэмиссионных катодов методами электронной микроскопии, комбинационного рассеяния света и рентгеновской дифрактометрии № 2
- Березин В. М. Проявление квантового размерного эффекта в электросопротивлении тонких пленок углерода № 10
- Богданова Д. А., Булярский С. В., Басаев А. С. Изменение ширины НОМО-LUMO-щели одностенных углеродных нанотрубок при хемосорбции водорода № 6
- Брехов К. А., Лавров С. Д., Афанасьев М. С., Шерстюк Н. Э., Мишина Е. Д., Кимель А. В. Линейный электрооптический эффект в пленках BST: расчет коэффициента Керра . . . № 4
- Ваньков В. А., Земляниников Н. С., Суханов В. С. Современные технологии и подходы создания миниатюрных приемопередающих модулей № 6
- Васильев В. Ю. Тренды развития методов химического осаждения из газовой фазы тонкопленочных материалов для прецизионных технологий № 9
- Вертянов Д. В., Тимошенков С. П., Петров В. С., Горюнова Е. П. Свойства и практическое применение полиимидных микроструктур № 11
- Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Несмелов С. Н., Коханенко А. П., Лозовой К. А. Технология создания структур с квантовыми точками Ge/Si молекулярно-лучевой эпитаксией № 9
- Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Несмелов С. Н., Коханенко А. П., Лозовой К. А. Современные методы создания структур с квантовыми точками Ge/Si . . № 10
- Волохов И. В. Исследование технологий получения многослойных гетероструктур с применением различных методов осаждения в вакууме изолирующих покрытий на корпусные элементы датчиков-преобразующей аппаратуры для авиационно-космической техники № 1
- Галиев Г. Б., Климов Е. А., Лаврухин Д. В., Ячменев А. Э., Галиев Р. Р., Пономарев Д. С., Хабибуллин Р. А., Федоров Ю. В., Бугаев А. С. Разработка и исследование фотопроводящих антенн на основе полупроводников группы A3B5, выращенных при пониженных температурах эпитаксиального роста . . № 6
- Галперин В. А., Громов Д. Г., Лебедев Е. А., Шулятьев А. С., Смирнов Д. И., Шилиева Ю. И. Размерный эффект в многослойных тонкопленочных термитных материалах на основе композита алюминий — нитрид меди № 6
- Горнев Е. С., Янович С. И. Процесс реактивно-ионного травления контактных окон в смеси на основе C_4F_8 для технологии менее 0,25 мкм № 8
- Гринькин Е. А., Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Тютюгин А. В., Турков В. Е. Кинетика травления неорганического "жертвенного" слоя при изготовлении чувствительных элементов инерциальных датчиков по технологии "Кремний-на-изоляторе" № 7
- Гурин С. А., Песков Е. В., Вергазов И. Р. Методика термостабилизации тонкопленочных гетерогенных структур № 11
- Демин Г. Д., Дюжев Н. А., Попков А. Ф., Чиненков М. Ю. Спин-поляризованная токовая эмиссия в вакуум и переключение магнитного состояния тонких nanoостровковых пленок . № 4
- Дибирова К. С., Козлов Г. В., Магомедов Г. М. Влияние кристаллической морфологии на формирование фрактального пространства для нанокompозитов полимер/органогилина . . № 1
- Ерошкин П. А., Шешин Е. П. Электронная пушка с автоэмиссионным катодом для вакуумных приборов № 1
- Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Турков В. Е., Рискин Д. Д., Кудрявцев П. Н., Четверов Ю. С. Особенности технологии изготовления высокочувствительных неохлаждаемых микроболюметрических матриц № 5
- Заярский Д. А., Невешкин А. А., Байбурун В. Б., Слаповская Ю. П. Создание многослойных структур на основе Alq_3 и исследование их свойств № 4
- Зубов Д. Н., Кельм Е. А., Милованов Р. А., Молодцова Г. В. Электрохимическое восстановление поврежденных контактных площадок кристаллов при анализе отказов современных интегральных схем № 5
- Кутыцкий В. А., Сорокина О. В., Маслов Л. П., Толмачев В. А., Васильева М. А. Синтез гетероструктур на основе висмутосодержащих оксидных стекол и их использование в качестве сенсорных элементов для определения содержания сероводорода и водяных паров в воздушной среде № 2
- Ларчиков А. В., Беклемышев В. И., Махонин И. И., Филиппов К. В. Формирование наноструктурных покрытий на поверхности трения машин и механизмов № 3
- Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Жвавый С. П. Электростатические микрокоммутаторы. Часть 3. Переключающие микрокоммутаторы № 1
- Побойкина Н. В. Использование алмаза в качестве теплоотводящего элемента: методы и устройства выращивания алмазных пленок и пластин № 3
- Рембеза С. И., Кошелева Н. Н., Рембеза Е. С., Свистова Т. В., Плотникова Е. Ю., Агапов Б. Л., Гречкина М. В. Многокомпонентные наноструктурированные пленки $(SnO_2)_x(ZnO)_{1-x}$ ($x = 0,5...1$) для газовой сенсорики и прозрачной электроники № 8
- Рехвишвили С. Ш. О теплофизических свойствах идеального графена при низких температурах № 10
- Синев Л. С., Рябов В. Т. Расчет коэффициентных напряжений в соединениях кремния со стеклом № 9
- Соколов Л. В., Жуков А. А., Парфенов Н. М., Ануров А. Е. Анализ современных технологий объемного микропрофилирования кремния для производства чувствительных элементов датчиков и МЭМС № 10
- Тимошков Ю. В., Курмашев В. И., Тимошков В. Ю., Сакова А. А. Формирование прецизионных 3D-микроструктур методом LIGA-like-технологии для компонентов МЭМС № 10
- Томош К. Н. Характеристики и использование ВЧ и СВЧ разрядов при создании твердотельных полупроводниковых приборов № 5
- Трегулов В. В., Гудзев В. В., Вишняков Н. В., Воробьев Ю. В., Толкач Н. М. Структура поверхности пленок пористого кремния, сформированных в электролите на основе HF с добавкой $KMnO_4$ № 11
- Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Романов А. В. Влияние внешних воздействий на сверхвысокочастотные характеристики композитных материалов с включениями из углеродных нанотрубок № 3

- Федоров Ю. В., Михайлович С. В.** Влияние параметров наногетероструктур и технологии изготовления на шумовые свойства AlGaIn/GaN HEMT № 10
- Фирсова Н. Ю., Елшин А. С., Марченкова М. А., Болотов А. К., Иванов М. С., Пронин И. П., Сенкевич С. В., Киселев Д. А., Мишина Е. Д.** Переключаемость перовскитных микрообластей пленок ЦТС, локально отожженных фемтосекундным лазером инфракрасного диапазона № 7
- Фрицлер К. Б., Селезнев В. А., Принц В. Я.** Микро- и наноструктурированные геккон-адгезивы: формирование и практические применения № 4
- Чуйко О. В., Кузнецов Е. В., Савельев М. И., Комарова Н. В., Сироткина М. С.** Технология формирования интегральной микрофлюидной КМОП-системы с нанопроволочными чувствительными элементами № 6
- Ячменев А. Э., Бугаев А. С., Федоров Ю. В., Хабибуллин Р. А., Пономарев Д. С., Галиев Г. Б.** Разработка и исследование метаморфных InAlAs/InGaAs/InAlAs наногетероструктур на подложках GaAs для приборов миллиметрового диапазона длин волн № 8

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Акопьян В. А., Захаров Ю. Н., Париню И. А., Лабанцев Ю. А., Рожков Е. В., Чебаненко В. А.** Лабораторный образец испытательного стенда для определения характеристик активных элементов пьезоэлектрических генераторов осевого типа в режиме их низкочастотного импульсного нагружения № 10
- Амеличев В. В., Генералов С. С., Сывороткин П. А., Шаманаев С. В., Платонов В. В.** Устройство управления микромеханическим реле на основе массива силовых МЭМС-ключей № 2
- Антонов А. А., Карпович М. С., Пичугин И. В., Курленко А. А., Васильев В. Ю.** Интегральная микросхема драйвера "мягкой" коммутации силовых ключей для мощных источников электропитания № 6
- Бурдин Д. А., Фетисов Ю. К., Чашин Д. В., Экономов Н. А.** Датчик магнитных полей гетеродина типа на основе нелинейного магнитоэлектрического эффекта № 2
- Васильев В. А., Москалев С. А., Ползунов И. В., Шокоров В. А.** Полупроводниковые микроэлектромеханические системы современных и перспективных датчиков давления № 11
- Галперин В. А., Громов Д. Г., Кищук Е. П., Маркеев А. М., Лебедев Е. А., Черникова А. Г., Дубков С. В.** Суперконденсатор на основе УНТ с использованием псевдоемкости тонких слоев оксидов металлов № 6
- Глинский И. А., Рубан О. А., Алешин А. Н., Зенченко Н. В., Мельников А. А.** Расчет тепловых режимов HEMT-транзисторов на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN № 11
- Годицын И. В., Генералов С. С., Поломошнов С. А., Сывороткин П. А., Амеличев В. В.** Интегральный конденсаторный преобразователь акустического давления для миниатюрного МЭМС-микрофона № 4
- Горох Г. Г., Захлебавая А. И., Белогуров Е. А., Хатько В. В., Таратын И. А.** Химические газовые сенсоры на подложках из нанопористого оксида алюминия № 9
- Гусев Д. В., Данилова Н. Л., Земляникова Н. С., Суханов В. С.** Многоканальные тензорезистивные преобразователи давления № 6
- Джашитов В. Э., Панкратов В. М.** Блок микромеханических чувствительных элементов с реверсивной системой терморегулирования на модуле Пельтье № 3
- Драгунов В. П., Доржиев В. Ю.** Трехэлектродная двухконденсаторная МЭМС со встроенным зарядом № 2
- Есман А. К., Кулешов В. К., Зыков Г. Л., Залесский В. Б.** ИК приемник на основе перехода Шоттки с резонансными наномикроструктурами № 3
- Макеев М. О., Иванов Ю. А., Мешков С. А., Снякин В. Ю.** Исследования термической деградации резонансно-туннельных диодов на базе AlAs/GaAs-наногетероструктур № 12
- Малашевич Н. И.** Разработка методики интеграции ОЗУ в базовых матричных кристаллах космического назначения № 6
- Мальцев П. П., Майтама М. В., Павлов А. Ю., Щаврук Н. В.** Расчет и изготовление узкополосного СВЧ микроэлектромехани-

- ческого переключателя для частотного диапазона 10...12 ГГц на подложках арсенида галлия № 6
- Новиков С. Г., Гурии Н. Т., Беринцев А. В., Родионов В. А., Штанько А. А., Федоров И. С.** Полупроводниковые приборы с S-образной передаточной вольт-амперной характеристикой № 7
- Новиков Ю. А.** Виртуальные измерительные приборы № 11
- Платонов К. В.** Микросборки с встроенными пассивными компонентами на кремниевой подложке № 6
- Распопов В. Я., Малютин Д. М., Иванов Ю. В., Грязни Д. Г.** Система ориентации на микромеханических акселерометрах № 9
- Семенов А. Н., Шалимов А. С., Зуев Е. В.** Исследование возможности создания на БМК 5503 микросхемы емкостного преобразователя линейного ускорения № 11
- Синев И. В., Смирнов А. В., Гребенников А. И., Сякина С. Д., Симаков В. В., Кисин В. В.** Влияние предварительного нагрева на распознавательную способность мультисенсорной микросистемы № 1
- Суханов А. В., Прокофьев И. В., Гусев Д. В.** Мультиагентная система мониторинга web-датчиков, созданная на основе наносенсорики № 6
- Сякина С. Д., Синев И. В., Смирнов А. В., Симаков В. В.** Электрохимический импеданс газочувствительных микросистем на основе поликристаллических слоев диоксида олова № 10
- Тимошенков С. П., Шерченков А. А., Нальский А. А., Ревина А. А., Лобус Р. Е.** Источник тока на фотоэлектрическом эффекте с повышенными показателями эффективности № 11
- Турков В. Е., Жукова С. А., Рискин Д. Д., Бабаевский П. Г., Резниченко Г. М.** Реактивные микродвигатели, изготавливаемые по технологии МСТ № 12
- Федоров Р. А.** Микросхема управления модулем радиационной защиты № 6

БИОЭЛЕКТРОНИКА

- Игнатов И. И., Мосин О. В.** Методы получения наночастиц коллоидного серебра № 2
- Игнатов И. И., Мосин О. В.** Структурные модели воды, описывающие циклические нанокластеры № 3
- Игнатов И. И., Мосин О. В.** Эффект Кирлиан в изучении газоразрядного свечения биологических объектов и воды № 12

СИСТЕМА-НА-КРИСТАЛЛЕ

- Беляев С. В., Шаманаев П. А., Щербаков С. В.** Программный модуль конфигурирования СнК № 6
- Вишнеков А. В., Ерохин В. В.** Проектирование систем-на-кристалле: выбор базовой технологии изготовления кристалла № 4
- Вишнеков А. В., Ерохин В. В., Иванова Е. М.** Верификация СНК: выбор стратегии № 12

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

- Бабуров В. А., Томош К. Н., Павлов В. Ю.** Модульная система дистанционного обучения и тестирования специалистов в области плазмохимических процессов № 11
- Денисова Е. В., Насибуллаева Э. Ш., Насибуллаев И. Ш., Мурашкин М. Ю.** Применение наноструктурных материалов в топливной автоматике № 8
- Смирнов А. В., Гребенников А. И., Грибов А. Н., Симаков В. В., Синев И. В., Кисин В. В.** Отклик газочувствительной микросистемы на запах перегретой изоляции электрического кабеля № 2

КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ, ВЫСТАВКИ

- Раткин Л. С.** К тридцатилетию Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук: фундаментальные и прикладные аспекты разработки нано- и микросистемной техники № 5
- Раткин Л. С.** Современные импортозамещающие технологии: от квантовой наноэлектроники — к компьютерной стеганографии № 12
- Сигейкин Г. И., Барачевский В. А., Прудников Н. В.** Фотоника и нанопотоника: состояние и перспективы № 8

INDEX OF ARTICLES PUBLISHED IN THE JOURNAL "NANO AND MICROSYSTEM TECHNIQUE" IN 2014

GENERAL QUESTIONS

- Rathkeen L. S.** Synchrotron & Neutron Researching of Nanosystems. № 1
- Rathkeen L. S.** Towards the Jubilee of National Scientific & Research Center "Kurchatov Institute": New Works in the Field of Nano- & Micro-System Technique. № 2

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

- Aleksandrov P. A., Budaragin V. V., Guk V. I., Litvinov V. L.** On Fault Tolerance of Nanoelectronic Integrated Circuits under Irradiation. № 1
- Barkaline V. V., Chashynski A. S.** Hydrogen Adsorption on Carbon Nanotubes with Interaction in Adsorbed Phase. № 2
- Galushka V. V., Bilenko D. I., Terin D. V.** Controlled Study of Mass Transfer in Nanostructures Agl-Ag by Tunneling Microscope Method. № 8
- Glukhova O. E., Kolesnikova A. S., Slepchenkov M. M.** Terahertz Emitter Based on Single-Walled Nanotube Filled with Fullerenes. № 10
- Samoylovich M. I., Bovtun V., Belyanin A. F., Nuzhnyy D., Kempa M., Klescheva S. M., Savinov M.** Dielectric Properties of the Opal Matrix with Filled Interspherical Nanospacing Zinc Oxide. № 7
- Sheshin E. P., Kolodyazhnyy A. Yu., Obiedkov A. M., Ketkov S. Yu., Kremlev K. V., Kaverin B. S., Semenov N. M.** Investigation of Field Emission Properties of Radial-Oriented Multiwall Carbon Nanotube Arrays. № 10
- Vorobjova A. I., Prischeva S. L., Utkina E. A., Komar O. M.** Formation and Properties of Nickel Nanopillars in Porous Aluminum Oxide. № 1
- Yakh'yaeva Kh. Sh., Kozlov G. V., Magomedov G. M.** The Dependence of Interfacial Adhesion Level on Carbon Nanotubes (Nanofibers) Ring-Like Structures Radius. № 8

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

- Abramov I. I., Kolomeitseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A., Basaev A. S.** Simulation of Hybrid Integrated Structures Based on Carbon Nanotubes. № 5
- Afonin S. M.** Decision Wave Equation for Electromagnitoeleastic Tasks of Actuators for Nano- and Microdisplacement. № 2
- Amelichev V. V., Generalov S. S., Yakukhina A. V., Shamanaev S. V., Platonov V. V.** The Design and Technology of the Matrix of Power Microelectromechanical Keys. № 3
- Artemova A. I., Mikhailov Y. A., Pankov V. V., Sukhanov V. S.** Optimization of Pressure Sensing Element Construction with Distributed Rigid Center Using 3D-Computer Modeling. № 6
- Artemova A. I., Mikhailov Y. A., Pankov V. V., Sukhanov V. S.** Optimization of Pressure Sensing Element Construction with Distributed Rigid Center Using 3D Computer Modeling. № 7
- Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Maxwell Displacement Current and "Universal" Dynamic Response in Nanoionics. № 5
- Dzhashitov V. E., Pankratov V. M., Golikov A. V.** Mathematical Modeling of Thermal Processes in Carbon Nanotubes and Fullerenes. № 11
- Galperin V. A., Razzhivin N. A.** Research of the Plasma Gate Resist Trimming Processes. № 6
- Glukhova O. E., Kolesnikova A. S., Slepchenkov M. M., Shmygin D. S.** Motion Control Phospholipids in the Electric Field. № 7
- Gridchin V. A., Vasilyev V. Y., Chebanov M. A., Byalik A. D., Chernov A. S.** A numerical simulation of the photoelectric fiber optic pressure sensor components. № 6
- Ignatov I. I., Mosin O. V.** Color Coronal Kirlian Spectral Analysis in Modeling of Non-Equilibrium Conditions with the Gas Electric Discharges, Simulating Primary Atmosphere. № 8

- Makarceva M. M.** Study of Efficiency for Design Automation Using Library of Fault Tolerant Cells with Redundancy. № 11
- Maltsev P. P., Matveenko O. S., Fedorov Y. V., Gnatyuk D. L., Krapukhin D. V., Zuev A. V., Bunegina S. L.** 5 mm-Wave Amplifier Monolithic Integrated Circuit with Integrated Antenna. № 9
- Markelov A. S., Trushin V. N., Chuprunov E. V.** Investigation the Possibility Formation of the Spatial Structure of X-Ray Beams with Use the Doped Crystals. № 4
- Molodtsova G. V., Milovanov R. A., Zubov D. N., Kelm E. A.** Approaches to a Die Decoupling during Failure Analysis of the 3D Package Integrated Circuits. № 7
- Podgorny Yu. V., Vorotilov K. A., Lavrov P. P., Sigov A. S.** Current-Voltage Dependencies of Porous PZT Films. № 9
- Pronin I. A., Averin I. A., Dimitrov D. Tz., Karmanov A. A.** Peculiarities of Structure and Synthesis Model Nanocomposites Composite Materials Composition $\text{SiO}_2\text{—Me}_x\text{O}_y$, Obtained with the Sol—Gel Technology. № 8
- Pronin I. A., Averin I. A., Moshnikov V. A., Yakushova N. D., Kuznetsova M. V., Karmanov A. A.** Percolation Model Based Gas Sensors Semiconductor Oxide Nanomaterials with Hierarchical the Pore Structure. № 9
- Roslyakov A. S.** Feasibility Study for Low Power IP Blocks for the Solution of Finite-Difference Equations in Low-Frequency Signal Conversions. № 6
- Sapogin V. G., Prokopenko N. N., Marchuk V. I., Manzhula V. G., Budyakov A. S.** Inductive Properties of Microscopic Conducting Ring with Density of Rotational Current of Azimuth Direction. № 1
- Senichkin A. P., Bugaev A. S., Jachmenev A. E.** Optimization of pHEMT Producing Technology on the GaAs Substrates with Doping Profile in the Form of Sn Nanowires. № 5
- Senichkin A. P., Bugaev A. S., Yachmenev A. E.** Investigation of the Current Instability Appearing while Apply Direct Current Perpendicularly to the Nanowires Inserted in the GaAs Crystal. № 3
- Sivchenko A. S., Kuznetsov E. V.** Methods of Analysis of the Main Characteristics of a CMOS IC Reliability Using Test Structures on Wafers. № 6
- Spirin V. G.** Design and Technology of the Layered Charge with Polymeric Insulation. № 7
- Timoshenkov S. P., Anchutin S. A., Plekhanov V. E., Kochurina E. S., Timoshenkov A. S., Zuev E. V.** Development of Mathematical Descriptions of the Micromechanical Ring Gyroscope. № 5
- Timoshenkov S. P., Anchutin S. A., Rubchic V. G., Zaryankin N. M., Vinogradov A. I., Dernov I. S., Kochurina E. S.** Features of the Design and Manufacturing of Micromechanical Accelerometer Sensor for SOI Structures. № 7
- Tyutyugin A. V., Zhukova S. A., Turkov V. E.** Bump Formation by Liquid Chemical Treatment for Flip-Chip Technology. № 5
- Vinokurov D. L.** Numerical Simulations of Magnetic Structure at the Compensated Ferromagnet — Multiferroic Interface. № 4
- Vishnekov A. V., Erokhin V. V., Ivanova E. M.** Automation of Microcontroller Choice Procedure. № 7
- Zenchenko N. V., Ruban O. A., Aleshin A. N., Glinskiy I. A., Melnikov A. A.** Simulation of Nonstationary HEMT-Transistor Thermal Modes. № 12

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

- Abdullaev D. A.** Change Set of Applied Materials at Reduction Topological Norms Production of Integrated Microcircuits. № 5
- Abdullaev D. A., Zaitsev A. A., Kelm E. A.** Selective Plasmochemical Etching of Silicon Nitride to Silicon Oxide. № 2
- Amelichev V. V., Blagov E. V., Kostyuk D. V., Vasilyev D. V., Belyakov P. A., Orlov E. P., Abanin I. E., Takhov V. S., Rukovichnikov A. I., Rossukanyy N. M.** Magnetoresistive Control Microsystem of Current and Current Fluctuations. № 1

- Averin I. A., Pronin I. A., Moshnikov V. A., Dimitrov D. Tz., Yakushova N. D., Karmanov A. A., Kuznetsova M. V. Analysis Catalytic and Adsorption Properties of D-Modifier Metal Tin Dioxide № 7
- Babayevsky P. G., Zhukova S. A., Obizhaev D. Yu., Grinkin E. A., Turkov V. E., Reznichenko G. M., Riskin D. D., Bychkova Y. A. MEMS Sensor Vacuum Wafer Level Packaging (Analytical Review). Part 1. Wafer Bonding and Dicing Technologies, Local Hermetic Sealing (Vacuum Encapsulation) of MEMS Sensor Sensitive Elements № 3
- Babayevsky P. G., Zhukova S. A., Obizhaev D. Yu., Grinkin E. A., Turkov V. E., Reznichenko G. M., Riskin D. D., Bychkova Y. A. MEMS Sensor Vacuum Wafer Level Packaging (Analytical Review). Part 2. Vacuum-Tight Electrical Interconnection Formation, Practice of Vacuum Preservation and Control in Working Cavities and General Tendencies of Development of MEMS Sensor Vacuum Wafer Level Packaging № 4
- Belyanin A. F., Samoylovich M. I., Borisov V. V. The Effect of Heat Treatment of the Carbon Films on Characteristics of Field Emission Cathodes on their Base № 8
- Belyanin A. F., Samoylovich M. I., Borisov V. V., Evlashin S. A. Study of Multiphase Carbon Films of Field Emission Cathodes Electron Microscopy, Raman Spectroscopy and X-Ray Diffraction Methods № 2
- Berezin V. M. The Manifestation of Quantum Size Effect in Electrical Conductance Thin Films of Carbon № 10
- Bogdanova D. A., Bulyarskii S. V., Basaev A. S. The Modification of HOMO-LUMO Gap of Single-Walled Carbon Nanotubes under the Hydrogen Chemisorption. № 6
- Brekhov K. A., Lavrov S. D., Afanasiev M. S., Sherstyuk N. E., Mishina E. D., Kimel A. V. Linear Electrooptical Effect In BST Films: Kerr Coefficient Calculation № 4
- Chuyko O. V., Kuznetsov E. V., Saveliev M. I., Komarova N. V., Sirotkina M. S. Technology Integrated CMOS Microfluidic Systems with Nanowire Sensing Elements № 6
- Demin G. D., Djuzhev N. A., Popkov A. F., Chinenkov M. Yu. Spin-Polarized Field Emission and Current-Induced Magnetization Switching of Nano-Island Magnetic Thin Films № 4
- Dibirova K. S., Kozlov G. V., Magomedov G. M. The Influence of Crystalline Morphology on Fractal Space Formation for Nanocomposites Polymer/Organoclay. № 1
- Eroshkin P. A., Sheshin E. P. Electron Gun with Field Emission Cathode for Vacuum Tubes № 1
- Fedorov Yu. V., Mikhaylovich S. V. The Effect of Nanoheterostructure Parameters and Fabrication Technology on the Noise Properties of AlGaIn/GaN HEMT № 10
- Firsova N. Yu., Elshin A. S., Marchenkova M. A., Bolotov A. K., Ivanov M. S., Pronin I. P., Senkevich S. V., Kiselev D. A., Mishina E. D. Switching of Perovskite Micro Regions in Amorphous PZT Thin Films, Annealed with Femtosecond IR Laser. № 7
- Fritzler K. B., Seleznev V. A., Prinz V. Ya. Micro- and Nanostructured Gecko — Inspired Adhesives: Fabrication and Applications . № 4
- Galiev G. B., Klimov E. A., Lavrukin D. V., Yachmenev A. E., Galiev R. R., Ponomarev D. S., Khabibullin R. A., Fedorov Yu. V., Bugaev A. S. Fabrication and Investigation of the Photoconductive Antennas Based on A3B5 Semiconductors Grown by MBE with the Low-Temperature Regime № 6
- Galperin V. A., Gromov D. G., Lebedev E. A., Shulyatiev A. S., Smirnov D. I., Shilyaeva Yu. I. Size Effect in Multilayer Thin Film Thermite Materials Based on Aluminum-Copper Nitride Composite № 6
- Gornev E. S., Yanovich S. I. Sub-Quarter Micron Process Node Contacts Reactive Ion Etching with C_4F_8 Based Gas Mixtures . . № 8
- Grinkin E. A., Zhukova S. A., Obizhaev D. Yu., Tyutyugin A. V., Turkov V. E. Kinetics of Inorganic Sacrificial Layer Etching in the Manufacture of Inertial Sensors Sensing Elements using "Silicon-On-Insulator" Technology № 7
- Gurin S. A., Peskov E. V., Vergazov I. R. Methods of Temperature Setting for Thin Film Heterogeneous Structures № 11
- Kutvistkiy V. A., Sorokina O. V., Maslov L. P., Tolmachev V. A., Vasilyeva M. A. The Synthesis of the Heterostructures Based on the Bismuth-Containing Oxide Glasses and their Usage in the Capacity of Sensing Elements for the Hydrogen Sulphide and Water Vapours Determination № 2
- Larchikov A. V., Beklemyshev V. I., Makhonin I. I., Filippov K. V. Formation of Nanostructured Coatings on the Friction Surfaces of Machines and Mechanisms № 3
- Mukhurov N. I., Efremov G. I., Zhvayvi S. P. Electrostatic Micro Switches. Part 3. Closing-Shutdown Micro Switches № 1
- Poboykina N. V. The Use of Diamond as a Heat Sink Element: Methods and Devices of Growing Diamond Films and Plates. . . № 3
- Rekhviashvili S. Sh. Thermophysical Properties of Ideal Graphene at Low Temperatures № 10
- Rembeza S. I., Kosheleva N. N., Rembeza E. S., Svistova T. V., Plotnikova E. Yu., Agapov B. L., Grechikina M. V. Multicomponent Nanostructured Films $(SnO_2)_x(ZnO)_{1-x}$ ($x = 0,5...1$) for Gas Sensors and Transparent Electronic № 8
- Sinev L. S., Ryabov V. T. Coefficient of Thermal Expansion Mismatch Induced Stress Calculation for Field Assisted Bonding of Silicon to Glass. № 9.
- Sokolov L. V., Zhukov A. A., Parfenov N. M., Anurov A. E. Analysis of Modern Technologies Surround Microproteinuria Silicon for the Production of Sensitive Elements of Sensor and MEMS. . . № 10
- Timoshkov Yu. V., Kurmashev V. I., Timoshkov V. Yu., Sakova A. A. Precision 3D-Microstructures by Liga-Like Technology for MEMS Components № 10
- Tomosh K. N. Characteristics of Microwave and High Frequency While Fabricating Semiconductor Devices № 5
- Tregulov V. V., Gudzev V. V., Vishnyakov N. V., Vorobjov Y. V., Tolkach N. M. The Surface of Porous Silicon Films Formed by $(HF + KMnO_4)$ Electrolyte. № 11
- Usanov D. A., Skripal A. V., Romanov A. V. Effect of the External Influences on the Microwave Characteristics of the Composite Materials with Inclusions Made of Carbon Nanotubes. № 3
- Vankov V. A., Zemlyannikov N. S., Sukhanov V. S. State-of-Art Technologies and Approaches for Transceiver Modules Implementation № 6
- Vasilyev V. Yu. Trends of Thin Film Chemical Vapor Deposition Methods for Precision Technologies Applications № 9
- Vertyanov D. V., Timoshenko S. P., Petrov V. S., Goryunova E. P. Properties and Practical Application of Polyimide Microstructures № 11
- Voitsekhovskii A. V., Kulchitskii N. A., Melnikov A. A., Nesmelov S. N., Kokhanenko A. P., Lozovoy K. A. Creation of Structures with Ge/Si Quantum Dots by the Method of Molecular Beam Epitaxy. № 9
- Voitsekhovskii A. V., Kulchitskii N. A., Melnikov A. A., Nesmelov S. N., Kokhanenko A. P., Lozovoy K. A. Modern Methods of Creation of Structures with Ge/Si Quantum Dots № 10
- Volokhov I. V. Study of Technologies for Producing Multilayer Heterostructures Using Different Methods Vacuum Deposition of Insulating Coatings on the Hull of the Sensor Elements, Transforming Equipment for Aerospace Engineering № 1
- Yachmenev A. E., Bugaev A. S., Fedorov Yu. V., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S., Galiev G. B. Fabrication and Investigation of Metamorphic InAlAs/InGaAs/InAlAs Nanoheterostructures Based on GaAs Wafers for Mm-Wave Band Devices № 8
- Zayarski D. A., Neveshkin A. A., Baiburin V. B., Slapovskaya Yu. P. Multilayer Structures Based on Alq3: the Creation and Study of Their Properties № 4
- Zhukova S. A., Obizhaev D. Yu., Turkov V. E., Riskin D. D., Kudryavtsev P. N., Chetverov Yu. S. Technology Features of High-Sensitive Uncooled Microbolometric Arrays Manufacturing . № 5
- Zubov D. N., Kelm E. A., Milovanov R. A., Molodtsova G. A. Electrochemical Recovery of Damaged Bonding Area During Failure Analysis of the Modern Integrated Circuits. № 5

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

- Akopyan V. A., Zakharov Yu. N., Parinov I. A., Labantsev Yu. A., Rozhkov E. V., Chebanenko V. A.** Laboratory Sample of Set-up for Definition of Active Element Characteristics of the Axial Type Piezoelectric Generators in Regime of Low-Frequency Impulse Loading. № 10
- Amelichev V. V., Generalov S. S., Syvorotkin P. A., Shamanaev S. V., Platonov V. V.** Control Device for the Microelectromechanical Relay with Array Using Mems Keys. № 2
- Antonov A. A., Karpovich M. S., Pichugin I. V., Kurlenko A. A., Vasilyev V. Yu.** Integrated Circuit Driver for Power Key Soft-Switching in Power Converters. № 6
- Burdin D. A., Fetisov Y. K., Chashin D. V., Economov N. A.** Magnetic Field Sensor of Heterodyne Type Using Nonlinear Magnetoelectric Effect. № 2
- Dragunov V. P., Dorzhiev V. Yu.** Three-Electrode Two-Capacitor Mems with Built-in Charge. № 2
- Dzhashitov V. E., Pankratov V. M.** The Unit of Micromechanical Sensors with the Reversible Thermal Control System on Peltier's Module. № 3
- Esman A. K., Kuleshov V. K., Zykov G. L., Zaleski V. B.** Infrared Detector on the Basis of the Schottky Junction with the Resonance Nano- and Microstructures. № 3
- Fedorov R. A.** Microcircuit for Radiation Protection Module Management. № 6
- Galperin V. A., Gromov D. G., Kitsyuk E. P., Markeev A. M., Lebedev E. A., Chernikova A. G., Dubkov S. V.** CNT-based Supercapacitor with Thin Metal Oxide Layers Pseudocapacity. № 6
- Glinksiy I. A., Ruban O. A., Aleshin A. N., Zenchenko N. V., Melnikov A. A.** Calculation of the Thermal Modes in the HEMT based Heterostructure AlGaIn/GaN. № 11
- Godovitsyn I. V., Generalov S. S., Polomoshnov S. A., Syvorotkin P. A., Amelichev V. V.** Integrated Condenser Acoustic Pressure Transducer for Miniature MEMS-Microphone. № 4
- Gorokh G. G., Zakhlebayaeva A. I., Belogyrov Ye. A., Khatko V. V., Taratyn I. A.** Chemical Gas Sensors on the Nanoporous Anodic Alumina Substrate. № 9
- Gusev D. V., Danilova N. L., Zemlyannikov N. S., Sukhanov V. S.** Multichannel Tensoresistive Pressure Transducers. № 6
- Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Meshkov S. A., Sinyakin V. Yu.** Investigation of Thermal Degradation of Resonant Tunneling Diodes Based on Nanoscale AlAs/GaAs Heterostructures. № 12
- Malashevich N. I.** Development of Methods for Integration of RAM in the Gate Array for Space Application. № 6
- Maltsev P. P., Maytama M. V., Pavlov A. Y., Shchavruk N. V.** Calculate and Manufacturing Narrowband RF Microelectromechanical Systems (MEMS) Switches for Frequency 10–12 GHz on Gallium Arsenide Substrate. № 6
- Novikov S. G., Gurin N. T., Berintsev A. V., Rodionov V. A., Shtan'ko A. A., Fedorov I. S.** Semiconductor Devices with an S-Shaped Transfer Current-Voltage Characteristics. № 7
- Novikov Yu. A.** Virtual Measuring Instruments. № 11
- Platonov K. V.** Micro Assemblies with Integrated Passive Devices on Silicon Substrate. № 6
- Raspopov V. Ya., Malyutin D. M., Ivanov Yu. V., Gryazin D. G.** System of Orientation on Micromechanical Accelerometers. № 9

- Semyonov A. N., Shalimov A. S., Zuev E. V.** Research of Availability of IC based on Array Chip 5503 for Capacitive Transducer of Linear Acceleration. № 11
- Sinev I. V., Smirnov A. V., Grebennikov A. I., Syakina S. D., Simakov V. V., Kisin V. V.** Influence of Temperature Pretreatment to Recognition Ability of Multisensory Microsystems. № 1
- Sukhanov A. V., Prokofiev I. V., Gusev D. V.** Multi-Agent Monitoring System of Web-Sensors Based on Nanosensors. № 6
- Syakina S. D., Sinev I. V., Smirnov A. V., Simakov V. V.** Electrochemical Impedance of the Gas-Sensitive Microsystems based Polycrystalline Tin Dioxide. № 10
- Timoshenkov S. P., Sherchenkov A. A., Nalsky A. A., Revina A. A., Lobus R. E.** Current source based on photoelectric effect with enhanced efficiency. № 11
- Turkov V. E., Zhukova S. A., Riskin D. D., Babayevsky P. G., Reznichenko G. M.** MEMS-Based Micro Propulsion Systems. № 12
- Vasiliev V. A., Moskaliev S. A., Polzunov I. V., Shokorov V. A.** Semiconductor Microelectromechanical Systems of Modern and Prospective Pressure Sensors. № 11

BIOELECTRONICS

- Ignatov I. I., Mosin O. V.** Kirlian Effect in Studying of Gas Discharge Glow of Biological Objects and Water by the Method of Color Kirlian Analysis. № 12
- Ignatov I. I., Mosin O. V.** Mathematic Models, Describing Cyclic Water Nanoclusters. № 3
- Ignatov I. I., Mosin O. V.** The Methods of Preparation of Nanoparticles of Colloid Silver. № 2

SYSTEMS-ON-CHIP

- Belyaev S. V., Shamanaev P. A., Shcherbakov S. V.** Software Module for Configuration of SoC. № 6
- Vishnevskiy A. V., Erohin V. V.** Systems-on-Chip Design: Chip Production Technology Choice. № 4
- Vishnevskiy A. V., Erohin V. V., Ivanova E. M.** SoC Verification: Choice of Strategy. № 12

APPLICATION OF MNST

- Baburov V. A., Tomosh K. N., Pavlov V. Yu.** Modular System of Distance Learning and Testing of Experts in the Field of Plasma Chemical Processes. № 11
- Denisova E. V., Nasibullaeva E. Sh., Nasibullayev I. Sh., Murashkin M. Yu.** Application of Nanostructured Materials in the Fuel Automatics. № 8
- Smirnov A. V., Grebennikov A. I., Gribov A. N., Simakov V. V., Sinev I. V., Kisin V. V.** Gas Sensor Microsystem Response to the Odor of Overheated Electrical Wire Insulation. № 2

CONFERENCES, SEMINARS, EXHIBITIONS

- Rathkeen L. S.** Modern Import Substitution Technologies: Form Quantum Nanoelectronics towards Computer Steganography. № 12
- Rathkeen L. S.** To the 30th Anniversary of Department of Nanotechnologies and Information Technologies of Russian Academy of Sciences: Fundamental and Applied Aspects of Development of Nano- & Micro-System Technique. № 5
- Sigeikin G. I., Barachevskiy V. A., Prudnikov N. V.** Photonics and Nanophotonics: State and Prospects. № 8

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

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

Сдано в набор 20.10.2014. Подписано в печать 19.11.2014. Формат 60×88 1/8. Заказ МС1214. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансд солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансд солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru