

### Рисунки к статье Ю. С. Бобровой, М. М. Андроника «МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ТОЛСТЫХ СЛОЕВ ЖИДКИХ ФОТОПОЛИМЕРОВ ВЫСОКОЙ ВЯЗКОСТИ»

J. S. Bobrova, M. Andronic

### «METHODS OF APPLYING A THICK-FILM LAYERS OF HIGH-VISCOSITY LIQUID PHOTOPOLYMERS»



Рис. 1. Схематическое изображение 3D-микросистемы с SU-8 в качестве межслойного диэлектрического слоя. Толщина фотополимерных слоев от 10 до 40 мкм

Fig. 1. Circuit of a 3D-microsystem with SU-8 as the interlaminar dielectric layer. The thickness of the photopolymeric layers is from 10 up to 40 µm



Рис. 2. Схематическое изображение многослойной печатной платы с полимерными оптическими волноводами. Толщина фотополимерных слоев от 5 до 100 мкм

Fig. 2. Circuit of a multilayered printed-circuit board with the polymeric optical waveguides. The thickness of the photopolymeric layers is from 5 up to 100 μm

# Том 19. № 4 🔶 2017

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Журнал индексируется в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и включен в международную базу INSPEC и в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по техническим, физико-математическим и химическим наукам. Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук Статьи имеют DOI и печатаются в журнале на русском и английском языках

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Издается с 1999 г.

Главный редактор Мальцев П. П., д.т.н., проф. Зам. гл. редактора Лучинин В. В., д.т.н., проф. Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

### Релакционный совет:

Редакционный совет: Агеев О. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН 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 Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН Каляев И. А., д.т.н., проф., акад. 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 Кульчин Ю. Н., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Дабунов В. А., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Никитов С. А., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Никитов С. А., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Килий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Сауров А. Н., д.т.н., проф., акад. РАН Сауров А. Н., д.т.н., проф., акад. РАН Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., акад. РАН Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН Редакционная коллегия: Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь) Андреев А., к.ф.-м.н., (Великобритания) Андриевский Р. А., д.х.н., проф. Астахов М. В., д.х.н., проф. Быков В. А., д.т.н., проф. Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф. Горнев Е. С., д.т.н., проф. Градецкий В. Г., д.т.н., проф. Кальнов В. А., к.т.н. 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. Леонович Г. И., д.т.н., проф. Панич А. Е., д.т.н., проф. Петросянц К. О., 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. Рыжий М. В., к.ф.-м.н., проф. (Япония) Телец В. А., д.т.н., проф. Тимошенков С. П., д.т.н., проф. Тодуа П. А., д.т.н., проф. Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н. Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф. Шептунов С. А., д.т.н., проф. Шубарев В. А., д.т.н., проф. Редакция: Антонов Б. И. (директор изд-ва) Лысенко А. В. (отв. секретарь) Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В. Фокин В. А., к.х.н. (ред. перевода) Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И	І ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ	основы
МНСТ		

Боброва	Ю.	С.,	Андроник	М.	М.	Методы	нан	iece	ния	тол	сты	K C	лоев	\$
жидких	фото	пол	имеров вь	ісок	ой в	вязкости	•				• •	•		195

Кульчицкий Н. А., Маянов Е. П., Наумов А. В. Арсенид галлия и приборы нано-, микро- и оптоэлектроники на его основе . . . . 207

Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г. Влияние ионизирующих излучений на электрофизические свойства халько-215

Трофимов А. А. Оптимизация толщины подложки приборных 219

### элементы мнст

Афонин С. М. Структурно-параметрические модели электромагнито	-
упругих актюаторов для нано- и микросистемной техники	227

Садков В. Д., Фомина К. С. Поглощающие элементы для реализа-238

### ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Смолин В. К. Использование микро- и нанотехнологий в производстве малогабаритных первичных источников электропитания . . . . . 244

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

### ПОДПИСКА:

по каталогу 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

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2017

INTERDISCIPLINARY, SCIENTIFIC, TECHNIQUE AND PRODUCTION JOURNAL

# NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

# (Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

**ISSN 1813-8586** DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 19 No. 4

2017

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof. - CHIEF EDITOR Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof. **DEPUTY CHIEF EDITOR** 

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

### **Editorial council:**

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

### **Editorial board:**

Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Andrievskii R. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof. 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. Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.) Kolobov Ju. R., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Kuzin A. U., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Petrosjants C. O., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Petrunin V. F., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Pozhela K.(Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.) Putilov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Ryzhii M. V., (Japan), PhD (Phys.), Prof. Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Shashkin V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Sheptunov S. 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. Vikulin V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

### **Editorial staff:**

Antonov B. I. (Director Publ.) Lysenko A. V. (Executive secretary) Chugunova A. V. Grigorin-Ryabova E. V. Fokin V. A., Cand. Sci. (Chem.) Shchetinkin D. A. (site)

The Journal is included in the international databases of the chemical sciences - Chemical Abstracts Service (CAS) and of the engineering sciences - INSPEC, and it is also indexed

in the Russian Science Citation Index (RSCI) based on the Web of Science platform.

The Journal is included in the Russian System of Science Citation Index

and the List of Journals of the Higher Attestation Commission of Russia. Its articles have DOI and are printed in the Journal in Russian and English languages.

The Journal is published under the scientific-methodical guidance of the Branch of Nanotechnologies and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences.

### CONTENTS

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

Bobrova J. S., Andronic M. M. Methods of Applying a Thick-Film 

Kulchitskiy N. A., Mayanov E. P., Naumov A. V. Gallium Arsenide: 

Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G., Mustafaev M. G. Influence of Ionizing Radiation on the Electrophysical Properties of Chalcogenides 

Trofimov A. A. Optimization of the Thickness of the Substrates for the 

### **MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS**

Afonin S. M. Structural-Parametric Models of Electromagnetoelastic 

Sadkov V. D., Fomina K.	S	• 1	Ab	soi	rpt	ive	e l	Ele	m	en	ts	fo	r	R	ea	liz	ati	ioı	n (	of	
Wide Attenuation Range							·		•	•	•				·	·			•		241

### **APPLICATION OF MNST**

Smolin V. K. Micro- and Nanotechnologies Applied to Production of 

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

To subscribe, please contact with: JSC "MK-Periodica": Tel: +7 (495) 672-7012 Fax: +7 (495) 306-3757 E-mail: import@periodicals.ru

# Материаловедческие и технологические основы MHCT Science of materials and technological basics of MNST

УДК 621.3.049.75: 667.657.4

DOI: 10.17587/nmst.19.195-206

Ю. С. Боброва, ассистент, e-mail: utd-utd@yandex.ru,
М. М. Андроник, магистрант, e-mail: m\_andronic@mail.ru,
Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана

## МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ТОЛСТЫХ СЛОЕВ ЖИДКИХ ФОТОПОЛИМЕРОВ ВЫСОКОЙ ВЯЗКОСТИ

Поступила в редакцию 25.11.2016

Приводится систематизация основных методов нанесения покрытий из жидких фоточувствительных полимеров, применяемых в нано- и микротехнологиях. Даются рекомендации по выбору метода нанесения толстых слоев фотополимеров (10...250 мкм) на прямоугольные заготовки с относительно высоким рельефом 2...35 мкм.

**Ключевые слова:** метод нанесения полимерного покрытия, жидкий фоторезист, фотополимер высокой вязкости, рельефная поверхность, прямоугольная заготовка

### Введение

Типовые толщины фоторезистивных покрытий, используемых в производстве микроэлектроники, не превышают 2 мкм с допуском на неравномерность покрытия 1...5 % по площади заготовки (на момент написания статьи максимальный диаметр полупроводниковых пластин, используемых в РФ, составляет 200 мм, в мире — 300 мм).

В производстве многослойных печатных плат при изготовлении внутренних слоев без отверстий применяют жидкие позитивные фоторезисты, наносимые толщиной от 0,1 до 5 мкм с допуском на неравномерность покрытия не хуже 10 % по площади заготовки, размер которой вместе с технологическими полями может достигать 400 × 500 мм.

В последнее десятилетие возникла потребность в формировании микро- и наноструктур с использованием фотолитографических процессов применительно к толстым слоям фоточувствительных полимеров. Толщина таких слоев составляет от десятков до нескольких сотен микрометров, а требования по неравномерности покрытия по площади заготовки — единицы процентов.

### Жидкие фоточувствительные полимеры

Самый распространенный представитель фотополимеров, наносимых толщиной от долей микрометра до сотен микрометров, — SU-8 (*MicroChem*,

США). Это негативный фоточувствительный материал на основе эпоксидной смолы со спектральной чувствительностью к *i*-линии (365 нм), позволяющий получать структуры с высоким аспектным отношением. Изначально SU-8 использовался в качестве фоторезиста при изготовлении матриц для микроформования микротеплообменников, деталей микроредукторов и микродвигателей, микропористых мембран и тому подобных изделий по LIGA-технологии (Lithographie, Galvanoformung, Abformung - нем. [1]). Но он может использоваться и в качестве изоляционного конструкционного материала (рис. 1, см. вторую сторону обложки) в 3D-микросистемах, а также в качестве основного материала при создании терагерцевых волноводов со сверхнизкими потерями [2, 3].

В связи с необходимостью повышения скорости передачи информации внутри устройств, а также между ними при их объединении в сложные быстродействующие системы ведутся поиски конструкторско-технологических решений по созданию полимерных оптических соединений (рис. 2, см. вторую сторону обложки).

В общем виде оптические соединения — это планарные полимерные волноводы [4—6], состоящие из фоточувствительной сердцевины (англ. *Core*), и фоточувствительной оболочки (англ. *Clad*). Оболочка при этом имеет более низкий коэффициент преломления по сравнению с сердцевиной (предпочтительно отличие в третьем знаке после запятой).

Разработкой оптических полимеров, которые совместимы со стандартными процессами фотолитографии, занимаются такие компании, как *Dow Chemical* (США), *Dow Corning* (США), *MicroChem Corp* (США), *Exxelis* (Великобритания), *Chemoptics* (Южная Корея), *Optical Interlinks* (США) и др. [7, 8].

Отличительным свойством этих фотополимеров, важным при реализации технологического процесса, является их относительно высокая вязкость. Значения динамического и кинематического коэффициентов вязкости некоторых жидких фоторезистов и фотополимеров при нормальных условиях приведены в табл. 1. Несмотря на востребованность, методы нанесения толстых (до 500 мкм) слоев негативных фотополимеров высокой вязкости на крупногабаритные прямоугольные заготовки до сих пор не исследованы в полной мере, равно как и методы их термообработки, экспонирования и проявки. На основе анализа источников информации, основная часть которых представлена в списке литературы [9—15], и данных производителей фотополимеров для изготовления оптических волноводов (LightLink XP-6701A и LightLink XP-5202A (Dow Chemical), OE-4140 UV и OE-4141 (Dow Corning), EpoCore и EpoClad (Micro resist tehnology GmbH), Ormocore и Ormoclad (Micro resist tehnology GmbH)) составлена табл. 2, позволяющая ориентироваться

> Таблица 1 *Table 1*

	·						
Наименование фотополимера Photopolymers	Динамическая вязкость, Па · с Dynamic viscosity, Pa · s	Кинематическая вязкость, м <sup>2</sup> /с <i>Kinematic viscosity, m<sup>2</sup>/s</i>	Применение Applications				
MicroChem Corp (CIIIA) Micro Chem Corp (USA)							
SU-8 серии 2010 SU-8 series 2010	0,45	0,00038	Негативный фоторезист, процес- сы получения элементов МЭМС.				
SU-8 серии 2015 SU-8 series 2015	1,5	0,00125	lab-on-chip, диэлектрические слои в низкочастотных микрокоммута-				
SU-8 серии 2025 SU-8 series 2025	5,49	0,0045	ционных платах на керамическом основании				
SU-8 серии 2035 SU-8 series 2035	8,59	0,007	Negative photoresist, processes for ob- taining of MEMS elements, lab-on-				
SU-8 серии 2075 SU-8 series 2075	27,2	0,022	chip, dielectric layers in the low-fre- quency microswitching boards on a ce				
SU-8 серии 2100 SU-8 series 2100	55,67	0,045	ramic basis				
SU-8 series 2100 SU-8 серии 2150 SU-8 series 2150	99,04	0,08					
Dow Chemical (CША)							
Cyclotene 4022-35	Нет данных Not available	0,000192	Диэлектрические слои в СВЧ пла- тах и микрокоммутационных пла-				
Cyclotene 4024-40	_"	0,00035	тах на керамическом основании				
Cyclotene 4026-46	''	0,0011	Dielectric layers in the microwave				
Cyclotene XUS35078 type 3	"	0,00195	boards and microswitching boards on a ceramic basis				
MicroChem Corp (CША) MicroChem Corp (USA)							
EpoClad (EpoCore) серии 5 EpoClad (EpoCore) series 5	0,39	0,00033	Оптические соединения Optical assemblages				
EpoClad (EpoCore) серии 10 EpoClad (EpoCore) series 10	1,01	0,00085					
EpoClad (EpoCore) серии 20 EpoClad (EpoCore) series 20	3,57	0,003					
EpoClad (EpoCore)	14,4	0,012					
MicroChem Corp (CША) Micro Chem Corp (USA)							
OrmoCore	2,9	Нет данных Not available	Оптические соединения Optical assemblages				
OrmoClad	2,5	_"_					
ΦΠ385	Нет данных	$6.5 \cdot 10^{-6}$	Позитивный фоторезист				
FP385	Not available	0,5 10	Positive photoresist				
ФП9120	_"_	$15 \cdot 10^{-6}$	<i>x</i>				
FP9120							

Вязкость жидких фотополимеров и фоторезистов
Viscosity of the liquid photopolymers and photoresists

Таблица 2 <i>Table 2</i>	Схематическое изображение Schematic image	о количества е surface ate)	$\bigcirc$	$\bigcirc$								
	Минимальная нерав- номерность [13], % Minimal nonuniformity [13], %	и заготовки избыточног лимера на подложке) antity of a polymer from th e photopolymer on a substr	10	2	10	10	5	10	15			
	Толщина, <sub>MKM</sub> <i>Thickness,</i> <i>micrometers</i>	: поверхност ьема фотопо <i>uperfluous qu</i> volume of th	10200	10500	10750	15150	0,1200	10150	0,001500			
	Динамическая вязкость, Па•с Dynamic viscosity, Pa•s	ые на удалении с имера ( $\leq 25\%$ об on removal of the $\mathfrak{I}$ niece ( $\leq 25\%$ of the	0,022	0,0250	0,540	0,0520	0,0050,5	0,041,5	0,00570			
JIIIMEPOB topolymers	тод thod	, основанн пол thods based of a workp	Прямое Direct	Обрат- ное <i>Reverse</i>	Жест- ким Rigid	Гибким Flexible	Bo3- душ- ным ножом <i>Air knife</i>	de Ma 1g	угирова- tion ating			
ких фотопс е liquid pho	Me Me	Методы <i>Ме</i>	Валковое Нанесе-	BaJIKOBOC HaHecc- Hue <i>Roll</i> <i>coating</i> pakeJiem/ pakeJiem/ <i>Knife</i> <i>coating</i>				Нанесени окунание Dip coati	Центриф ние <i>Centrifug</i> c or Spin-co			
(егоды нанесения жид thods of deposition of th	Схематическое изображение <i>Schematic</i> <i>image</i>						in the second se					
Me	Минимальная нерав- номерность [13], % Minimal nonuniformity [13], %	е на дозировании on dispensing	ае на дозировании on dispensing	ые на дозировании on dispensing	е на дозировании on dispensing	2	5	ć	1	2	10	5
	Толщина, <sub>MKM</sub> <i>Thickness,</i> <i>micrometers</i>	ч, основаннь <i>fethods based</i>	10250	15520	5 500		25250	0,5100	0,5100			
	Динамическая вязкость, Па•с Dynamic viscosity, Pa•s	Mero <sub>A</sub> M	0,01520	50300	\$ 500.0		0,0010,5	0,010,3	0,0250,35			
	leтод lethod		oň ating	зионный эп coating	ание М	coating	ящее ние <i>ating</i>	Аэро- зольное Aerosol	Ультра- звуко- вое Ultra- sound			
	ŴŴ		Щелев Slot cot	Экстру Еxtrusi	Нанесе	Curtain	Скольз нанесе Slide co	Распы- ление <i>Spray</i>	coating			

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, Том 19, № 4, 2017 –

в методах нанесения жидких фотополимеров в зависимости от их вязкости.

### Методы, основанные на дозировании

Методы, основанные на дозировании, заключаются в том, что средняя толщина покрытия определяется объемом дозируемого полимера, размерами и конфигурацией инструмента, зазором между рабочей поверхностью инструмента и подложкой, а также скоростью перемещения инструмента и подложки относительно друг друга. Толщина получаемого покрытия при этом не зависит от реологических параметров наносимого жидкого полимера. К таким методам относятся щелевое и экструзионное нанесение, нанесение поливом и др. (табл. 2).

Щелевой метод нанесения. Жидкий полимер вытесняется из распределительной емкости через щель металлического инструмента на движущуюся подложку. При этом зазор между задней рабочей поверхностью инструмента и подложкой заполнен полимером, а зазор между передней рабочей поверхностью инструмента и подложкой может быть заполнен частично или полностью. Все это минимизирует захват воздуха при нанесении полимера.

В случае щелевого нанесения наибольшее влияние на выбор технологических параметров процесса нанесения оказывают капиллярные силы и силы вязкости. Размер зазора между инструментом и подложкой выдерживается в интервале от 2 до 10 получаемых толщин покрытия.

Экструзионный метод нанесения. В экструзионном методе нанесение полимерного покрытия происходит аналогично щелевому методу, с той разницей, что жидкий полимер не смачивает внешние поверхности инструмента. Зазор между инструментом и подложкой составляет до 100 толщин покрытия. При многократном увеличении зазора жидкость относительно малой вязкости начинает течь под действием гравитационных сил перпендикулярно основанию подложки и получается метод занавеса.

Щелевой и экструзионный методы являются довольно гибкими. С помощью одного и того же инструмента можно нанести покрытия вязкостью от долей до нескольких десятков Па•с. Скорость перемещения подложки относительно инструмента (основной технологический параметр процесса нанесения) при этом может меняться от 0,1 до ≥10 м/с. Щелевым методом можно нанести одновременно несколько слоев, что описывается множеством патентов на устройство рабочего инструмента, но не сильно распространено в производстве.

С помощью щелевого метода наносятся фоточувствительные материалы (фоторезисты), магнитные суспензии, воск, адгезивы, силиконы, пены. Могут быть нанесены расплавы металлов и органических материалов малой вязкости.

Для нанесения материалов высокой вязкости применяется экструзионный метод.

Метод нанесения поливом. Метод нанесения жидких полимеров поливом может быть осуществлен на оборудовании для щелевого и экструзионного метода (при высоте зазора между инструментом и подложкой от 0,05 до 0,2 м). Отличительная особенность метода заключается в свободном падении жидкого полимера на поверхность движущейся подложки. Нанесение поливом имеет два главных достоинства: с его помощью можно наносить тонкие покрытия на неровные поверхности, и процесс нанесения может осуществляться на больших скоростях (от 0,7 до 10 м/с), обеспечивающих высокую производительность. Нанесение на неровную поверхность возможно благодаря относительно большой скорости столкновения жидкости с подложкой, что намного превышает скорость изменения высоты рельефа на поверхности. Большие скорости нанесения тоже достигаются благодаря высокой скорости столкновения жидкости (вязкостью от 0,004 до 0,08 Па · с) с подложкой. Давление, возникающее в месте контакта жидкости с подложкой, вытесняет воздух, который мог бы оказаться запертым между поверхностью подложки и полимерным покрытием.

Первое промышленное применение метода нанесения поливом было осуществлено при производстве шоколада. Благодаря возможности нанесения полимерных покрытий на неровные поверхности метод нанесения поливом стал довольно распространенным в мебельной промышленности. Среди других массовых производств, использующих метод нанесения поливом, можно выделить производство фотопленок, алюминиевой фольги и гофрированного картона.

**Метод скользящего нанесения.** Щелевой метод изначально не был предназначен для нанесения более чем одного слоя за раз. Потребность нанесения за раз нескольких слоев полимера (для достижения требуемой толщины или многослойности покрытия) возникла в индустрии фотопленок, в связи с чем в 1956 г. был изобретен метод скользящего нанесения.

Инструмент для нанесения жидких полимеров скользящим методом состоит из нескольких щелевых горловин, расположенных в наклонной плоскости. Зазор между инструментом и подвижным рулоном гибкого основания составляет 0,2...0,4 мм. Для управления процессом регулируют скорость нанесения (от 0,1 до 4 м/с), а также величину вакуума под зоной контакта жидкости и материала основания ( $10^4$ ... $10^3$  Па). Общая толщина полимерного покрытия, полученная методом скользящего нанесения, на практике редко превышает 100 мкм.

Аэрозольное и ультразвуковое распыление. Данный метод используется для нанесения покрытий из маловязких жидких полимеров, например, фоторезистов с большим содержанием растворителя. В процессе распыления жидкость измельчается на капли диаметром в несколько микрометров. Пленка формируется в процессе осаждения этих капель на поверхность заготовки. Распылением можно создать равное по толщине покрытие на сложной рельефной поверхности, но из-за испарения растворителя в процессе распыления это покрытие будет иметь достаточно высокую шероховатость, сопоставимую с радиусом капель.

Среди инженеров-технологов отмечено естественное стремление понизить вязкость жидких фотополимеров путем добавления соответствующих растворителей. При целенаправленном изменении структурно-реологических свойств жидкого полимера следует учитывать, что в результате получится фотополимер, за качества которого его производитель не несет ответственности, и в случае применения разбавленного фотоматериала в качестве конструкционного необходимо будет осуществить его предварительные лабораторные исследования и испытания. Для понижения вязкости фоторезистов (материалов, применяемых в качестве временных технологических покрытий) такой способ понижения вязкости приемлем, но сопряжен с длительным перемешиванием, обезгаживанием и существенным изменением параметров операции сушки нанесенного слоя.

### Методы нанесения, основанные на удалении с поверхности заготовки избыточного количества фотополимера

К методам, основанным на удалении с поверхности заготовки избыточного количества фотополимера, относятся высокопроизводительные процессы валкового нанесения, нанесение ракелем (ножом), окунание, центрифугирование (см. табл. 2) и их разновидности. При этом толщина получаемого покрытия во многом определяется реологическими свойствами наносимого жидкого полимера и зависит от соответствующих им технологических режимов нанесения.

**Валковое нанесение.** Валковое нанесение — процесс, при котором на непрерывно движущейся поверхности с помощью двух и более вращающихся валков создается тонкий слой жидкого полимера. Толщина покрытия при этом определяется размером зазора между валками, а также скоростью и направлением их вращения.

Различают две разновидности валкового нанесения: прямое валковое нанесение (*Direct roll coating*), при котором валки вращаются в противоположных направлениях и обратное валковое нанесение (*Reverse roll coating*), при котором валки вращаются в одном направлении. Нанесение полимерного покрытия ракелем является частным случаем валкового нанесения, когда одна поверхность (чаще подложка) остается неподвижной.

Существует большое число разновидностей оборудования для валкового нанесения, в том числе и нанесения ракелем. Это оборудование является относительно простым в своей реализации, но уступает по точности таким методам, основанным на дозировании, как щелевое и экструзионное.

Прямое нанесение валками чаще используется для формирования на подложках без рельефа покрытий толщиной от 10 до 60 мкм из маловязких жидкостей при скорости процесса от 0,05 до 1 м/с. Среди недостатков прямого нанесения валками можно выделить малые вязкости наносимых жидких полимеров и чувствительность толщины наносимого слоя к зазору между валками и скорости их вращения. Из-за недостаточной согласованности скоростей вращения валков и неверно выбранного зазора между ними появляется так называемое "оребрение" поверхности наносимого покрытия. Данный дефект может быть уменьшен при увеличении зазора между валками, уменьшении скорости их вращения или снижении вязкости жидкого полимера. В крайнем случае снижают требования к равномерности толщины наносимого покрытия.

Обратное нанесение валками является одним из наиболее гибких методов. С его помощью можно наносить слои полимеров вязкостью от 0,02 до 50 Па  $\cdot$  с толщиной от 10 до 500 мкм при очень высоких скоростях (от 0,05 до 10 м/с). К существенным недостаткам метода можно отнести высокую шероховатость наносимого покрытия, обусловленную неконтролируемым испарением растворителя из-за высоких скоростей нанесения и высокую стоимость оборудования, ориентированного на массовое производство.

Для многономенклатурного единичного и мелкосерийного производства электронных изделий, характерного для РФ, оба этих метода являются избыточно производительными и почти не применяются при нанесении дорогостоящих фоточувствительных материалов.

*Нанесение жестким ракелем.* Нанесение ракелем — процесс, при котором вначале формируется толстый слой покрытия. Толщина этого слоя затем изменяется (регулируется) с помощью закрепленного ножа (ракеля), находящегося на требуе-

мой высоте над поверхностью подложки. Толщина покрытия зависит от зазора между рабочей частью ракеля и поверхностью подложки, а также от угла скоса рабочей плоскости ракеля. Метод используется для нанесения слоев толщиной 50...2500 мкм жидких полимеров вязкостью от 1 до 10 Па·с. Скорость нанесения может варьироваться от 0,05 до 2 м/с. Главными недостатками метода является склонность покрытия к появлению полос с недостаточной или избыточной толщиной полимера, а также чувствительность к точности геометрической формы подложки (непараллельности ее поверхностей, отклонения от плоскостности).

Толщина покрытия зависит от размера зазора между рабочей частью ракеля и поверхностью подложки. Обычно толщина покрытия составляет от 0,5 до 1 размера зазора. В случаях нанесения тонких слоев толщина покрытия становится очень чувствительной к неравномерности основания и рабочей части ракеля, наличию локальных дефектов на рабочей части полотна ракеля и другим случайным изменениям зазора. При неправильно установленном наклоне полотна ракеля (выборе угла рабочей плоскости ракеля) наносимое покрытие будет неравномерным по толщине, возникнет эффект ряби.

**Нанесение гибким ракелем.** Данный метод используется для нанесения минеральных пигментов, латекса или других функциональных покрытия на бумагу при больших скоростях. Типичные размеры таких ножей составляют 0,25...0,5 мм толщина и от 20 до 100 мм по длине. Скорость нанесения может достигать 20 м/с при вязкостях полимеров от 0,05 до 20 Па · с, а толщина покрытия составлять от 15 до 150 мкм.

Данный метод также используется для выравнивания покрытия из вязких полимеров.

*Нанесение воздушным ножом.* Точнее было бы называть этот метод "методом выравнивания воздушным ножом", поскольку нанесение реализуется другим способом, например, ракелем, поливом, окунанием и т.д. Воздушные ножи используются для удаления избытков жидких полимеров с поверхности заготовок при достижении определенной толщины покрытия, сушки, охлаждения жидких покрытий, для создания дополнительного давления. Серьезное ограничение по применимости данного способа — низкая равномерность толщины полимерного покрытия, наносимого на заготовки с рельефом, характерным для изделий электронной промышленности.

*Нанесение методом окунания*. Метод нанесения окунанием является одним из первых методов нанесения покрытий из жидких полимеров и до сих пор широко используется, поскольку позволяет реализовать нанесение полимерного покрытия на

неплоские и/или нежесткие поверхности. До изобретения устройств, реализующих методы дозирования, окунание использовалось для изготовления фотопленок. На данный момент большой расход дорогостоящих полимеров, невозможность нанесения слоя на одну сторону плоской заготовки, а также высокая неравномерность получаемого покрытия по толщине, сделали этот метод неактуальным в производстве электронных и оптоэлектронных изделий на основе планарных технологий.

**Центрифугирование.** Центрифугирование — на данный момент самый распространенный и хорошо изученный метод нанесения фотополимерных покрытий на заготовки в микроэлектронной промышленности. Ограничение на применение этого метода накладывает наличие рельефа на поверхности заготовки, а также высокие требования к равномерности покрытия по толщине для фотолитографии высокого разрешения.

Часто рельеф на поверхности подложек может иметь геометрические параметры более 1 мкм по высоте и от десятков до сотен микрометров по ширине. Большинство факторов, связанных с выравниванием толщины фотополимерного покрытия во время центрифугирования и после него, хорошо изучены и могут быть предсказаны. Одним из главных факторов, влияющих на качество формируемого покрытия, является ширина рельефа на поверхности заготовки. Приемлемой планаризации можно ожидать во время центрифугирования заготовки с рельефом шириной менее 50 мкм, а более высокой плоскостности верхней поверхности покрытия — при ширине менее 10 мкм. Степень планаризации зависит и от соседних элементов рельефа: покрытие вокруг изолированного выступа хуже поддается планаризации, чем над плотно расположенными выступами.

Реологические свойства жидких фотополимеров тоже влияют на степень выравнивания слоя во время нанесения. Жидкие полимеры, которые имеют большую вязкость и большее объемное содержание твердой фракции, лучше планаризируются. После центрифугирования при последующем нагреве можно достичь улучшения степени планаризации, но при ширине рельефа свыше 200 мкм самопланаризация оказывается недостаточной, чтобы получить высокую плоскостность верхней поверхности покрытия.

### Выбор метода нанесения

Среди рассмотренных методов нанесения полимерных покрытий наибольший интерес для единичного и мелкосерийного производства изделий электронной и оптоэлектронной техники пред-

### Методы нанесения толстых слоев жидких фотополимеров и их технологические возможности

Methods of deposition of thick layers of the liquid photopolymers and their technological opportunities

			Обеспечиваемые технологические требования Ensured technology requirements												
№ п/п	Метод Methods	Толи нанос го по тия, <i>Thic.</i> of co micro.	цина симо- окры- мкм kness ating, meters	Вязкость, Па∙с <i>Viscosity,</i> <i>Pa•s</i>		Объемное содержа- ние твер- дой фрак- ции, % Volume content of the solid fraction, %	ф по, For su	Форма подложки Form of the substrate		Размер подложки $a \times b, a \neq b,$ MM Size of the substrate $a \times b,$ $a \neq b, mm$	Рельеф н ности па Толщин мальны Relief surface substrate ness/mini lash, min	а поверх- одложки. а/мини- й зазор, км on the e of the e. Thick- mal back- crometers	Расход фотополимера Consumption of a photopolymere		
		<20	≥20	0,0051,2	1,220	6377	0			(100350) × (100500)	18/50	35/250	$V_{\Phi\Pi} = V_{\Pi O K P}$	$V_{\Phi\Pi} \gg V_{\Pi OKP}$	
1	Щелевой Slot		x	х	x	X	x	x	x	х	х	х	х		
2	Экструзион- ный <i>Extrusion</i>		х		х	х	x	x	x	Х			х		
3	Распыление аэрозольное Aerosol spray	х		х			x	x	x	Х	x	х	х		
4	Распыление ультразвуко- вое Ultrasound spray	х		x			x	x	x	х	x	х	Х		
5	Нанесение ракелем <i>Knife coating</i>		x	х	х	х	x	x	x	х	х	х		х	
6	Центрифу- гирование <i>Centrifugation</i>	X	x	x	х	х	X							Х	
I	Тримечание: И	 ΦΠ —	объем	подаваемо	ого на по	одложку фот	опо.	лиме	epa,	<i>V</i> <sub>покр</sub> — объем	покрытия	l.			

Note:  $V_{\Phi\Pi}$  – volume of the photopolymer submitted to the substrate of the photopolymer,  $V_{\Pi O K P}$  – volume of coating.

Vole.  $\phi \phi_{\Pi} - volume of the photopolymet submittee to the substrate of the photopolymet, <math>v_{\text{nokp}} - volume of country of the photopolymet submittee to the substrate of the photopolymet.$ 

ставляют шесть методов, результаты анализа которых приведены в табл. 3.

На основании сравнения методов нанесения вязких фотополимеров на крупногабаритные заготовки прямоугольной формы с рельефом на поверхности (табл. 3) можно сделать вывод о целесообразности применения оборудования, реализующего нанесение либо щелевым методом, либо нанесение ракелем. Такое технологическое оборудование представлено на рынке следующими производителями: *nTact* (США), *Nordson Extrusion Dies Industries* (США), *EuroTech Inc.* (Германия), *GMA Machinery Enterprise Co., Ltd.* (Тайвань), *TSE Troller AG* (Швейцария), *Coating Tech Slot Dies Corporate* (США) и др.

### Заключение

При выборе технологического оборудования для нанесения толстых слоев вязких фоторезистов,

применяемых в МЭМС-технологии, достаточно остановить свой выбор на одном из вариантов современного оборудования, реализующего метод нанесения фоторезиста центрифугированием.

Для производства многослойных печатных плат с полимерными оптическими межсоединениями или 3D-микросистем с фотополимером в качестве диэлектрических слоев рекомендуется выбирать оборудование, реализующее нанесение ракелем или щелевым методом, поскольку оно обеспечивает высокие требования по равномерности наносимых покрытий из вязких фотополимеров на крупноформатные прямоугольные заготовки с относительно высоким рельефом на поверхности.

### Список литературы

1. Цветков Ю. Б. Микротехнология — универсальная основа производства микроэлектроники // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 4. С. 86—87.

2. Tian Y., Shang X., and Lancaster M. J. Fabrication of multilayered SU8 structure for terahertz waveguide with ultralow transmission loss // J. Micro/Nanolithography, MEMS, MOEMS. 2014. Vol. 13, N. 1. P. 013002.

3. Исаев В. М., Кабанов И. Н., Комаров В. В. и др. Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014. № 4 (34). С. 5–21.

4. **Kahlenberg F.** Structure-Property Correlations in Fluoroaryl Functionalized Inorganic-Organic Hybrid Polymers for Telecom Applications: Dis. ... Ph. D. Würzburg: Julius-Maximilians-Universität Würzburg. 2004. 194 p.

5. **Karppinen M.** High bit-rate optical interconnects on printed wiring board. Micro-optics and hybrid integration. Helsinki: Edita prima Oy. 2008. 162 p.

6. **Bosman E., Van Steenberge G., Geerinck P.** et. al. Fully embedded optical and electrical interconnections in flexible foils. Proc. Eur. Microelectron. Packag. Conf. (EMPC). 2009. P. 1–5.

7. Ma H., Jen A. K. Y., Dalton L. R. Polymer-based optical waveguides: materials, processing, and devices // Adv. Mater. Res. 2002. Vol. 14, N. 19. P. 1339–1365.

8. **Eldada L.** High Bit Rate Optical Data Bus Technologies for Advanced Wireless Handheld Devices. DuPont Photonics

Technologies. 2008. P. 10. URL: http://www.wocc.org/doc/presentation/OC4-Deyu/WOCC2007\_OC4\_Louay\_Eldada.pdf

9. **Моро У.** Микролитография. В 2-х ч. Ч. 1: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 605 с.

10. **Tracton A. A.** Coatings Technology Handbook (3rd edition). New York: CRC Press Taylor & Francis Group. 2006. 830 p.

11. Хмелев В. Н., Шалунов А. В., Шалунова А. В. Ультразвуковое распыление жидкостей: Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. 2010. 272 с.

12. **Kistler S., Schweizer P.** Liquid Film Coating: Scientific Principles and Their Technological Implications. New York: Chapman & Hall. 1997. 783 p.

13. **Wolf R.** A Technology Decision — Adhesive Lamination or Extrusion Coating/Lamination? Enercon Industries Corporation. 2009. 26 p. URL: http://www.tappi.org/content/events/10PLACE/papers/wolf1.pdf

14. **Sengupta A.** Fluid Mechanics of Coating Flows, Centre of Advanced Fluid Mechanics. Erlangen. 2008. URL: http://www.leb.eei.uni-erlangen.de/winterakademie/2008/report/content/course01/pdf/0115.pdf

15. **Gutoff E., Cohen E., Kheboian G.** Coating and drying defects: troubleshooting operating problems. New York: John Wiley & Sons. 2006. 368 p.

J. S. Bobrova, Graduate student, assistant, utd-utd@yandex.ru,
M. M. Andronic, Undergraduate, m\_andronic@mail.ru,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

### Corresponding author:

**Bobrova Julia S.,** Graduate student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: utd-utd@yandex.ru

## Methods of Applying a Thick-Film Layers of High-Viscosity Liquid Photopolymers

Reseived on November 25, 2016 Accepted on December 19, 2016

The basic trends for higher speed of the radio-electronic devices resulted in development of the corresponding technologies (3D-microsystems of monolithic electronic modules on ceramic heat-spreading planes and multilayered printed-circuit boards with integral optical interconnections and the internal component placement).

The level of integration in the given cases sets requirements to the thickness of the dielectric layers, which are connected with the thicknesses of such embedded elements, as low-profile or thin-film passive components (R, C, L), thinned crystals, vertically radiating lasers, micromirrors, etc.

In this connection for the given technologies one of the primary tasks is development of the dielectric layers with thickness from units up to several hundreds of micrometers. Photopolymers ensure the necessary dielectric, optical, mechanical and other indicators, which make them suitable as the constructional materials.

The thickness and uniformity of a deposited coating in many respects depend on the viscosity of a photopolymer, which imposes restrictions on selection of a method for its application. This article presents a system of the basic methods for deposition of coatings from the liquid photosensitive polymers applied in the nano- and microtechnologies, and recommendations for selection of a method for deposition of the thick layers of the photopolymers (10...500  $\mu$ m) on the rectangular work pieces with a relief (2...35  $\mu$ m).

**Keywords:** polymer layer coating method, liquid photoresist, high-viscosity photopolymer, relief surface, large-sized rectangular substrate

For citation:

**Bobrova J. S.**, Andronic M. Methods of Applying a Thick-Film Layers of High-Viscosity Liquid Photopolymers, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 195–206.

DOI: 10.17587/nmst.19.195-206

### Introduction

Typical thicknesses of the photoresistive coatings in the microelectronic productions do not exceed 2  $\mu$ m with the admission for the non-uniformity of a coating of 1...5 % on the workpiece area (at the moment of writing of the article the maximal diameter of the semi-conductor plates in the Russian Federation was 200 mm, and in the world — 300 mm).

During manufacturing of the inner layers without apertures the productions of the multilayered printedcircuit boards apply liquid positive photoresists of thickness from 0.1 up to 5  $\mu$ m with the admission for the non-uniformity of coating not worse than 10 % on the workpiece area, the size of which with the technological fields can reach 400 × 500 mm.

A demand appeared for formation of the micro- and nanostructures and the use of the photolithographic processes with reference to the thick layers of the photosensitive polymers. The thickness of the layers is from tens up to several hundreds of micrometers, and the requirement concerning the non-uniformity of a coating on the workpiece area — units of a percent.

### Liquid photosensitive polymers

The most widespread photopolymer, the deposited layer of which can have thickness from fractions of a micrometer up to hundreds of micrometers, is SU-8 (*MicroChem*, USA). It is a negative photosensitive material based on epoxy resin with the spectral sensitivity to the i-line (365 nm), allowing to obtain structures with high aspect relation. Initially SU-8 was used as a photoresist in manufacturing of matrixes for microformation of the micro-heat exchangers, parts of microreducers and micromotors, microporous membranes and similar products by LIGA-technology (Lithographie, Galvanoformung, Abformung [1]). But it can also be used as a quality insulation material (fig. 1, see the 2-nd side of cover) in 3D-microsystems, and also as a basis for development of the terahertz wave guides with ultralow losses [2, 3].

In connection with the necessity to increase the speed of information transfer inside the devices and between them because of their integration into complex high-speed systems the search is going on for solutions concerning the development of polymeric optical connections (fig. 2, see the 2-nd side of cover).

In a general the optical connections are the planar polymeric wave guides [4-6] consisting of a photosensitive core (*Core*) and a photosensitive cover (*Clad*). The clad has a lower factor of refraction in comparison with the core (the preferable difference is in the third sign after point).

The optical polymers compatible with the standard photolithography are being developed by *Dow Chemi*-

*cal, Optical Interlinks, Dow Corning, Micro Chem Corp* (USA), *Exxelis* (Great Britain), *Chemoptics* (South Korea) and other companies [7, 8].

A distinctive feature of the photopolymers, important for realization of the technological process, is their rather high viscosity. The values of the dynamic and kinematic coefficients of viscosity of certain liquid photoresists and photopolymers under normal conditions are presented in table 1.

Deposition of thick (up to  $500 \ \mu$ m) layers of the negative photopolymers of high viscosity on large-sized rectangular workpieces, as well as their heat treatment, exposure and development, have not been fully investigated. On the basis of the analysis of the information sources, the most of which are presented in literature [9–15], and the data provided by the manufacturers of the photopolymers for the optical waveguides (*Light-Link XP-6701A* and *LightLink XP-5202A* (*Dow Chemical*), *OE-4140 UV* and *OE-4141* (*Dow Corning*), *Epo-Core* and *EpoClad*, *Ormocore* and *Ormoclad* (*Micro resist technology GmbH*)) table 2 was compiled, presenting the methods of deposition of the liquid photopolymers depending on their viscosity.

### Methods based on dispensing

The methods of dispensing are based on the fact that the average thickness of a coating is determined by the volume of the dispensed polymer, the sizes and configuration of a tool, the backlash between the working surface of the tool and the substrate, and the speed of movement of the tool and of the substrate in relation to each other. The thickness of a coating does not depend on the rheological parameters of a liquid polymer. Among the methods are the slot and extrusion coatings, curtain coating, etc. (table 2).

*Slot coating.* A liquid polymer is displaced from a distributive capacity through a slot of a metal tool on a moving substrate. Thus the backlash between the back working surface of the tool and the substrate is filled with the polymer, and the backlash between the forward working surface of the tool and the substrate can be filled partially or completely. All this minimizes the air capture during the polymer deposition.

In case of the slot coating the greatest influence on the selection of the technological parameters of deposition is rendered by the capillary forces and the forces of viscosity. The size of the backlash between the tool and the substrate is maintained from 2 up to 10 obtained thicknesses of coating.

*Extrusion coating.* The extrusion method of deposition is similar to the slot one with the difference that a liquid polymer does not moisten the external surfaces of the tool. The backlash between the tool and the substrate is up to 100 thicknesses of the coating. In

case of a multiple increase of the backlash the liquid of a relatively low viscosity begins to flow under the action of the gravitational forces perpendicular to the basis of the substrate and the effect of a curtain is produced.

The slot and extrusion coatings are flexible enough. By means of the same tool it is possible to deposit coatings with viscosity from fractions up to several tens of Pa  $\cdot$  s. The speed of movement of the substrate in relation to the tool (the basic technological parameter of deposition) can vary from 0.1 up to  $\geq 10$  m/s. By the slot method it is possible to deposit simultaneously several layers, which are described by numerous patents for the device of the working tool, but the method is not wide-spread in production.

By means of the slot method the photosensitive materials (photoresists), magnetic suspensions, wax, adhesive, silicons and foams are deposited. Also the melts of metals and organic materials of low viscosity can be deposited.

For deposition of the materials of high viscosity the extrusion method is applied.

*Curtain coating.* The curtain method of deposition can be carried out on the equipment for the slot and extrusion methods (at the height of the backlash between the tool and the substrate from 0.05 up to 0.2 m). Its distinctive feature is a free falling of the liquid polymer on the surface of the moving substrate. The curtain deposition has two main advantages: it is possible to deposit thin coatings on rough surfaces, and deposition can be carried out at high speeds (from 0.7 up to 10 m/s), which ensure high efficiency. The deposition on a rough surface is possible due to a relatively high speed of collision of a liquid with a substrate, which is much higher than the speed of a change of the height of the relief on the surface. The high speeds of deposition are also reached thanks to the high speed of collision of a liquid (with viscosity from 0.004 up to 0.08  $Pa \cdot s$ ) with a substrate. The pressure in the place of the contact of a liquid with a substrate ejects the air, which could appear locked between the surface of a substrate and a polymeric coating.

The first industrial application of the method was carried out by a chocolate manufacture. Due to a possibility of deposition of the polymeric coatings on the rough surfaces, the curtain method of deposition is rather wide-spread in the furniture industry. Among the other mass productions using the method it is possible to mention the productions of films, aluminum foil and the corrugated cardboard.

*Slide coating.* Initially the slot method was not intended for deposition of more than one layer at a time. The necessity for deposition of several layers of a polymer at once (for achievement of the demanded thickness or multiple layers of coatings) appeared in the

film industry, where in 1956 the method of slide deposition was invented.

The tool for deposition of the polymers by the slide method consists of several slot mouths located in an inclined plane. The backlash between the tool and the mobile roll of the flexible basis equals to 0.2...0.4 mm. The control is effected of the speed of deposition (from 0.1 up to 4 m/s) and also of the vacuum under the zone of contact of the liquid and the basis material  $(10^4...10^3 \text{ Pa})$ . In practice the total thickness of the polymeric coating received by the given method rarely exceeds 100 micrometers.

*Aerosol and ultrasonic spray.* The given method is used for deposition of coatings from the low-viscosity liquid polymers, for example, photoresists with a big content of solvent. For dispersion the liquid is crushed in drops with diameter of several micrometers. A film is formed during sedimentation of those drops on the surface of a workpiece. By dispersion it is possible to create an even by thickness coating on a complex relief surface, but because of the solvent's evaporation during dispersion the coating will have a roughness comparable with the radius of the drops.

Technologists tend to lower the viscosity of the liquid photopolymers by adding of the corresponding solvents. At a purposeful change of the structural-rheological properties of a liquid polymer it is necessary to take into account that the manufacturer does not bear responsibility for the quality of the photopolymer obtained as a result, and in case of application of a diluted photographic material as a constructional material it is necessary to carry out its preliminary laboratory research and tests. In order to lower the viscosity of the photoresists (the materials applied as temporary technological coatings) the method of lowering the viscosity is acceptable, but is connected with long hashing, degassing and essential change of the parameters of the operation of drying of the deposited layer.

### The methods of deposition based on removal of the superfluous quantity of the photopolymer from the surface of a workpiece

The methods based on removal of the superfluous quantity of the photopolymer from the surface of a workpiece include the high-efficiency processes of the roll coating, knife coating, dip, centrifugation (see table 2) and their versions. At that, the thickness of the received coating in many respects is determined by the rheological properties of a liquid polymer and depends on the corresponding technological modes of deposition.

*Roll coating.* Roll coating is the process, during which by means of rotating rolls a thin layer of a liquid polymer is created on a continuously moving surface. The thickness of a coating is determined by the size of

a backlash between the rolls and also by the speed and direction of their rotation.

There are two versions of the roll coating: direct coating (*Direct roll coating*) — the rolls rotate in the opposite directions and reverse coating (*Reverse roll coating*) — the rolls rotate in one direction. The knife coating is a special case of the roll coating, when one surface (usually the substrate) remains motionless.

There are many versions of the equipment for the roll coating, including the knife coating. This equipment is rather simple, but less accurate compared with the methods based on dispensing (slot and extrusion).

The direct coating by rolls is more often used for formation on the substrates without a relief of the coatings with thicknesses from 10 up to 60 µm from low-viscosity liquids at the speed from 0.05 to 1 m/s. Among the drawbacks of the direct roll coating are low viscosity of the liquid polymers and sensitivity of the thickness of the deposited layer to the backlash between the rolls and the speeds of their rotation. An insufficient coordination of the speeds of rotation of the rolls and an incorrectly selected backlash cause ribbing of the surfaces of the deposited coating. The defect can be reduced due to increase of the backlash between the rolls, decrease of the speed of their rotation or decrease of viscosity of a liquid polymer. As a last resort, the requirements to uniformity of the thickness of a deposited coating can be lowered.

The reverse roll coating is one of the most flexible methods. With its help it is possible to deposit layers of polymers with viscosity from 0.02 up to 50 Pa  $\cdot$  s and thickness from 10 up to 500  $\mu$ m at very high speeds (0.05...10 m/s). Among its drawbacks are a high roughness of the coating caused by an uncontrollable evaporation of the solvent because of high speeds of deposition and high cost of the equipment intended for mass production.

For a multiproduct individual and small-scale manufacture of the electronic devices, typical for the Russian Federation, both methods are superfluously productive and are almost not applied for deposition of the expensive photosensitive materials.

**Rigid knife coating.** Knife coating is a process, which in the beginning forms a thick coating layer. Then the thickness of the layer changes (it is controlled) by means of a knife fixed on the demanded height over the substrate surface. The thickness of a coating depends on the backlash between the working part of the knife and the substrate surface, and also on the skew angle of the working plane of the knife. The method is used for deposition of layers with thickness of  $50...2500 \ \mu m$  of the liquid polymers with viscosity from 1 up to  $10 \ Pa \cdot s$ . The speed of deposition can vary from 0.05 up to  $2 \ m/c$ . Its main drawbacks are a trend to occurrence of strips with an insufficient or superfluous thickness of a poly-

mer, and also sensitivity to the accuracy of the geometrical form of the substrate (lack of parallelism of the surfaces, deviations from the planeness).

The thickness of a coating depends on the size of the backlash between the working part of a knife and the substrate surface. Usually the thickness of a coating is from 0.5 up to 1 size of the backlash. In cases of thin layers the thickness of a coating is very sensitive to the non-uniformity of the basis and the working part of the knife, to presence of the local defects on the working part of the blade of the knife and to other casual changes of the backlash. An incorrectly established inclination of the blade of the knife (selection of the angle of the working plane of the knife) causes non-uniformly of the thickness of the coating and ripples.

**Flexible knife coating.** The method is used for coating of the mineral pigments, latex or other functional coatings on a paper at high speeds. The typical sizes of the knives are 0.25...0.5 mm — thickness, and 20...100 mm — length. The seed of deposition of coating can reach 20 m/s at viscosities of the polymers of  $0.05...20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , and the thickness of a coating varies from 15 up to 150  $\mu\text{m}$ .

The method is also used for alignment of a coating from the viscous polymers.

*Air knife coating.* It would be more correctly to call it "an air knife alignment method", because a coating is realized by another method, for example, knife, curtain, dip, etc. The air knives are used for removal of the surpluses of the liquid polymers from the surface of the workpieces for achievement of a certain thickness of a coating, drying, cooling of the liquid coatings, and creation of an additional pressure. A serious restriction for application of the method is a low uniformity of the thickness of the polymeric coating deposited on the workpieces with a relief, typical for the products of electronic industry.

**Dip coating.** This is one of the first methods for deposition of coatings from the liquid polymers and it is widely used, because it allows a deposition of a polymeric coating on the nonplanar and nonrigid surfaces. Before the invention of the dispensing devices, the dip method was used for manufacturing of films. A big consumption of expensive polymers, impossibility of deposition of a layer on one side of a flat workpiece, and also a high non-uniformity of a coating by thickness, made the method irrelevant for manufacture of the electronic and optoelectronic products on the basis of the planar technologies.

*Centrifugation.* It is the most widespread and well studied method of deposition of photopolymeric coatings on the workpieces in the microelectronic industry. Application of the method is restricted by presence of a relief on the workpiece surfaces, and also by high requirements to the uniformity of a coating by thickness for the high resolution photolithography.

The relief on a surface of the substrates can often have geometrical parameters more than 1 µm of height and from tens up to hundreds of micrometers of width. Most factors of alignment of the thickness of the photopolymeric coating during the centrifugation and after it are well studied and can be predicted. One of the primary factors influencing the quality of the coating is the width of the relief on the surface of a workpiece. An acceptable planarization can be expected during the centrifugation of a workpiece with a relief and a width less than 50  $\mu$ m, while a higher planeness of the top surface of a coating can be expected at the width less than 10 µm. The degree of planarization depends on the neighboring elements of a relief: the coating around the isolated ledge is less subjected to planarization, than the one over the densely located ledges.

The rheological properties of the liquid photopolymers influence the degree of alignment of a layer during deposition. The liquid polymers, which have higher viscosity and bigger volume content of a solid fraction, are better planarized. After the centrifugation and heating it is possible to reach a better degree of planarization, but at the width of a relief over 200  $\mu$ m the self-planarization appears to be insufficient for obtaining of a high planeness of the top surface of a coating.

### Selection of a method of coating

Out of the considered methods for deposition of the polymeric coatings of the greatest interest for the individual and small-scale manufactures of the electronic and optoelectronic products are the 6 methods, the results of the analysis of which are presented in table 3.

On the basis of comparison of the methods of deposition of the viscous photopolymers on large-sized workpieces of a rectangular form with a relief on the surface (table 3) it is possible to draw a conclusion on the expediency of application of the equipment for the slot coating or knife coating. In the market such technological equipment is presented by the following manufacturers: *nTact, Coating Tech Slot Dies Corporate* (USA), *Nordson Extrusion Dies Industries* (USA), *Euro-Tech Inc.* (Germany), *GMA Machinery Enterprise Co., Ltd.* (Taiwan), *TSE Troller AG* (Switzerland), and others.

### Conclusion

When selecting the equipment for deposition of thick layers of the viscous photoresists applied in MEMS technologies, it is enough to choose one of the variants of the equipment realizing the method of deposition of a photoresist by centrifugation. For manufacture of the multilayered printed-circuit boards with the polymeric optical interconnections or 3D-microsystems with a photopolymer as a dielectric layer, it is recommended to choose the equipment realizing the knife coating or the slot coating, because it meets high requirements of the uniformity of the coatings of the viscous photopolymers on the large-sized rectangular workpieces with rather high relief on the surface.

### References

1. **Tsvetkov Yu. B.** Mikrotekhnologiya — universal'naya osnova proizvodstva mikroelektroniki, *Tehnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2005, no. 4, pp. 86—87 (in Russian).

2. Tian Y., Shang X. and Lancaster M. J. Fabrication of multilayered SU8 structure for terahertz waveguide with ultralow transmission loss, *Micro/Nanolithography, MEMS, MOEMS*, 2014, vol. 13, no. 1, p. 013002.

3. Isaev V. M., Kabanov I. N., Komarov V. V. et. al. Sovremennye radioelektronnye sistemy teragertsovogo diapazona, *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2014, no. 4 (34), pp. 5–21. (in Russian).

4. Kahlenberg F. Structure-Property Correlations in Fluoroaryl Functionalized Inorganic-Organic Hybrid Polymers for Telecom Applications: Dis. ... Ph. D. Würzburg: Julius-Maximilians-Universität Würzburg, 2004, 194 p.

5. **Karppinen M.** High bit-rate optical interconnects on printed wiring board, *Micro-optics and hybrid integration*. Helsin-ki: Edita prima Oy, 2008, 162 p.

6. Bosman E., Van Steenberge G., Geerinck P. et. al. Fully embedded optical and electrical interconnections in flexible foils, *Proc. Eur. Microelectron. Packag. Conf. (EMPC)*, 2009, pp. 1–5.

7. Ma H., Jen A. K. Y., Dalton L. R. Polymer-based optical waveguides: materials, processing, and devices, *Adv. Mater. Res*, 2002, vol. 14, no 19, pp. 1339–1365.

8. Eldada L. High Bit Rate Optical Data Bus Technologies for Advanced Wireless Handheld Devices. DuPont Photonics Technologies, 2008, pp. 10–11. URL: http://www.wocc.org/doc/presentation/OC4-Deyu/WOCC2007\_OC4\_Louay\_Eldada.pdf.

9. Moro U. *Mikrolitografiya*: V 2-kh chastey. Ch. 1: Per. s angl. Moscow, Mir, 1990, 605 p. (in Russian).

10. **Tracton A. A.** *Coatings Technology Handbook (3rd edition).* New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006, 830 p.

11. **Khmelev V. N., Shalunov A. V., Shalunova A. V.** *Ultrazvukovoe raspylenie zhidkostey: monografiya*, BTI, Biysk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta, 2010, 272 p. (in Russian).

12. **Kistler S., Schweizer P.** Liquid Film Coating: Scientific Principles and Their Technological Implications. New York: Chapman & Hall, 1997, 783 p.

13. Wolf R. A Technology Decision — Adhesive Lamination or Extrusion Coating/Lamination? Enercon Industries Corporation, 2009, 26 p. URL: http://www.tappi.org/content/events/10PLACE/papers/wolf1.pdf.

14. Sengupta A. Fluid Mechanics of Coating Flows. Centre of Advanced Fluid Mechanics. Erlangen, 2008. URL: http://www.leb.eei.uni-erlangen.de/winterakademie/2008/report/content/course01/pdf/0115.pdf.

15. **Gutoff E., Cohen E., Kheboian G.** *Coating and drying defects: troubleshooting operating problems.* New York: John Wiley & Sons, 2006, 368 p. Н. А. Кульчицкий, д-р техн. наук, проф., e-mail: n.kulchitsky@gmail.com,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Московский технологический университет,
Е. П. Маянов, вед. науч. сотр., ген. директор, А. В. Наумов, ст. науч. сотр., аналитик-исследователь,
АО "Гиредмет", Москва

## АРСЕНИД ГАЛЛИЯ И ПРИБОРЫ НАНО-, МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ НА ЕГО ОСНОВЕ

Поступила в редакцию 12.12.2016

Приведен анализ современного состояния рынка GaAs и приборов на его основе. Один из наиболее быстрорастущих сегментов микроэлектроники сверхвысоких частот — это интегральные схемы (ИС) на GaAs для мобильной телефонии. В последнее десятилетие рынок мобильной связи демонстрирует стремительный рост. Поэтому мировой рынок арсенида галлия бурно развивается. Рынок подложек GaAs к 2017 г., согласно прогнозам, составит 3,6 млн кв. дюймов и 650 млн долл. Отмечается, что на данный момент российский рынок материалов (GaAs и dp.) имеет незначительный объем и в ближайшей перспективе не достигнет уровня, необходимого для появления конкурентоспособного на мировом уровне отечественного производителя. Спецификой российского рынка является низкая, по сравнению с мировой, доля гражданского рынка микроэлектроники. До недавнего времени основная потребность отечественных производителей радиоэлектронных и телекоммуникационных систем в СВЧ ИС покрывалась за счет зарубежных поставок. При этом национальные производители занимали на рынке нишу полупроводниковой продукции для военных устройств, чье применение исключает возможность использования импортных компонентов. С 2015 г. появляются проекты под эгидой Росэлектроники с участием ряда институтов по производству пластин GaAs. В то же время существует понимание, что для создания материалов современной электронной компонентной базы в России необходимо развивать производства особо чистых соеби необходимо использовань существующий и хорошо себя показавший механизм Федеральных целевых программ "Стратегические материалы".

Ключевые слова: арсенид галлия, рынок, цены, спрос, потребление, сырьевые резервы, особочистый галлий и мышьяк

### Арсенид галлия (GaAs) — основной материал СВЧ-электроники

В середине 60-х гг. ХХ века в США под эгидой US Department of Defense (DoD) были начаты иссле-

дования свойств GaAs, которые завершились разработкой интегральных схем (ИС) высокого быстродействия, используемых в "интеллектуальных" системах управления огнем и в суперкомпьютерах. *DoD* финансировал программу разработки ИС типа MIMIC (Microwave/Millimeter Wave Monolitic Integrated Circuits), в последующем — MAFET-схем (Microwave Analog Front end Technology) (рис. 1). В настоящее время промышленность GaAs-ИС, в основном, выпускает приборы на полевых транзисторах с управляющим p-n переходом (JFET), полевые транзисторы с затвором Шоттки (MESFET — Metal Semiconductors Field Effect Transistor) и GaAs-псевдоморфные гетероструктурные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (GaAs *p*-НЕМТ). С промышленным освоением процессов обработки пластин GaAs диаметром 150 мм существенно снизилась стоимость *p*-НЕМТ-приборов. Это обеспечило их широкое распространение во все сектора применения, от мобильных телефо-



Fig. 1. Dynamics of GaAs device market development in 1999-2016 (thousand million USD) [14]

### Основные типы приборов на основе GaAs

Main types of GaAs devices

Приборы Device	Структура Structure	Назначение Purpose
Светодиоды (СД) от ИК- до УФ-области Light-emitting diodes (LED) from IR- to UF region	Эпитаксиальные слои GaAlAs, GaAsP или InGaAsP на GaAs GaAlAs, GaAsP, or InGaAsP-on-GaAs epitaxial layers	СД стандартной яркости — для индикаторов, цифровых дисплеев и ИК-излучателей; СД повышенной яркости — для подсветок, иллюминации, сигнальных устройств, указателей, автомобильных огней Standard brightness LEDs: indicators, digital displays and IR radiators, high brightness LEDs for accent lights, illuminations, signaling devices, indicators, car lights
Лазерные диоды Laser diodes	Основа — GaAlAs и InGaAsP GaAlAs- and InGaAsP wafers	Для устройств записи и считывания CD и DVD-дисков, в телекоммуникационных устройствах, BOЛC, медицине, принтерах, для накачки твердотельных лазеров CD- and DVD recorders and readers; telecommunication devices; fiber-optical communication lines; medicine; printers; solid-state lasers pumping
Солнечные батареи Solar batteries	Эпитаксиальные слои легированного GaInAs или AlGaInP на Ge Doped GaInAs or AlGaInP-on-Ge epitaxial layers	Для бортовых источников питания космических аппаратов; растет рынок наземных батарей такого типа. On-board power sources for space vehicles; market of ground-based batteries of the type is growing
Аналоговые и цифровые интегральные схемы Analog and digital integrated circuits	Эпитаксиальные слои GaInP, GaInAs, AlGaInP и др. на GaAs Epitaxial layers of GaInP, GaInAs, AlGaInP etc on GaAs	Высокоскоростные логические блоки, коммуникационные блоки для телекоммуникационных систем; усилители мощ- ности для мобильных телефонов High-speed logical blocks; communications units of telecommunica- tion systems; power amplifiers for mobile phones

нов и базовых станций до радаров и систем связи миллиметрового диапазона [1, 2].

Основные типы приборов на основе GaAs приведены в табл. 1 и на рис. 2 (см. третью сторону обложки) [3—8].

### Способы получения монокристаллов GaAs

В электронике наибольшее применение имеют следующие материалы:

1. Полуизолирующий (ПИ) GaAs с высоким удельным сопротивлением ( $10^7$  Ом · см). Такой материал используется при изготовлении высокочастотных ИС и дискретных микроэлектронных приборов. Для ПИ-GaAs высокое удельное сопротивление обеспечивается тем, что уровень Ферми в середине запрещенной зоны закрепляется благодаря существованию глубокого донорного центра, известного как EL2 и связанного с собственными антиструктурными дефектами GaAs. Роль компенсирующих мелких акцепторов выполняют атомы фоновой примеси углерода и антиструктурные дефекты GaAs. Помимо высокого удельного сопротивления, монокристаллы ПИ-GaAs должны иметь высокие значения подвижности носителей заряда и высокую макро- и микроскопическую однородность распределения свойств как в поперечном сечении, так и по длине выращенных слитков.

2. Легированный кремнием (ПП) GaAs *n*-типа проводимости с низкой плотностью дислокаций.

Монокристаллы сильно легированного кремнием  $(10^{17}...10^{18} \text{ см}^{-3})$  GaAs, помимо высокой проводимости, должны иметь достаточно совершенную кристаллическую структуру. Пригодными для производства светодиодов считаются монокристаллы с плотностью дислокаций  $N_D < 10^4 \text{ см}^{-2}$ , а для лазеров — с  $N_D < 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ . Такой материал используется в оптоэлектронике для изготовления инжекционных лазеров, свето- и фотодиодов, фотокатодов. Такие кристаллы являются материалом для генераторов СВЧ-колебаний, их применяют для изготовления туннельных диодов, способных работать при более высоких температурах, чем кремниевые, и на более высоких частотах, чем германиевые.

3. Монокристаллы арсенида галлия, легированные хромом. Этот материал используется в инфракрасной оптике.

4. Монокристаллы арсенида галлия, легированные цинком или теллуром. Такие монокристаллы применяют в производстве оптоэлектронных приборов.

Исходный поликристаллический GaAs обычно получают путем реакции паров мышьяка с металлическим галлием при высокой температуре в запаянных кварцевых ампулах. Как правило, емкость с мышьяком, расположенную в одном конце ампулы, нагревают до температуры 891К, в результате чего давление паров мышьяка в ампуле возрастает до 1 атм., что необходимо для получения стехио-



Рис. 3. Динамика развития выращивания кристаллов GaAs методом Чохральского из-под флюса — рост массы и диаметра слитка

Fig. 3. Dynamics of the LEC-CZ method development: ingot mass and diameter growth

метрического GaAs. Пары мышьяка взаимодействуют с металлическим галлием, который находится в другом конце ампулы в лодочке из кварца или пиролитического нитрида бора (PBN) при температуре 1511 К. После того как мышьяк полностью прореагирует с галлием, образуется поликристаллическая загрузка GaAs.

В промышленном производстве монокристаллов GaAs используют три метода выращивания: метод Чохральского с жидкостной герметизацией расплава слоем борного ангидрида (*Liquid Encapsulated Czochralski — LEC*), метод горизонтальной направленной кристаллизации в двух вариантах: "по Бриджмену" (*Horizontal Bridgman — HB*) или кристаллизации в движущемся градиенте температуры (*Horizontal Gradient Freeze — HGF*) и метод вертикальной направленной кристаллизации (BHK) в тех же двух вариантах (*Vertical Bridgman — VB* и *Vertical Gradient Freeze — VGF*).

В установку для вытягивания кристаллов методом Чохральского загружают поликристаллический слиток GaAs в тигле с наружным графитовым элементом. GaAs расплавляют при температуре, близкой к 1511 К, и кристалл вытягивают в инертной атмосфере под давлением, которое может изменяться от единиц до 100 атм. Расплав арсенида галлия заключен в оболочку из оксида бора ( $B_2O_3$ ), которая предотвращает распад расплава.

Динамика развития метода в части роста значений загрузки и диаметра выращиваемого кристалла приведена на рис. 3.

За последние 40 лет в СВЧ полупроводниковой промышленности наблюдается увеличение диаметра пластин GaAs с 50 до 150 мм, так как это снижает затраты на производство приборов как минимум на 20...25 % при каждом переходе на больший диаметр. В настоящее время промышленность преимущественно использует пластины диаметром 150 мм. Ожидается, что использование пластин диаметром 150 мм продолжится в прогнозируемом периоде до 2020 г. за счет значительных инвестиций, осуществленных таким крупным производителем, как WIN Semiconductor (Тайвань) в модернизацию и строительство новых заводов для производства пластин диаметром 150 мм. Следует отметить, что отрасль движется в сторону развития технологии пластин диаметром 200 мм, и опытное производство, как ожидается, появится к концу 2018 г. Исследователи из Стэнфордского университета работают над созданием

технологии производства приборов на пластине GaAs диаметром 200 мм.

В последние годы в развитии метода VGF выращивания GaAs появилась новая тенденция — переход к групповому полунепрерывному выращиванию.

# Использование GaAs в производстве электронных приборов

Применимость различных технологий выращивания GaAs для электронных приборов приведена в табл. 2.

> Таблица 2 *Table 2*

Применимость различных технологий выращивания GaAs Applicability of GaAs single crystal ingots obtained by specific pulling techniques for use in electronic devices of various types

Приборы Device	Тип прибора <i>Type of device</i>	Предпочтитель- ная технология Preferable technique			
Полевые транзисторы металл — полупровод- ник (MESFET) Metal-semiconductor field-effect transistors (MESFET)	Униполярный транзистор Unipolar transistor	LEC			
CBЧ-транзисторы (HEMT) High electron mobility transistor (HEMT)	Униполярный транзистор Unipolar transistor	LEC			
Транзисторы с гетеро- переходом ( <i>HBT</i> ) <i>Heterojunction bi polar</i> <i>transistors (HBT</i> )	Биполярный транзистор Bipolar transistor	ВНК либо LEC VDS or LEC			
Лазерные и светодиоды Lasers and light emitting diodes	Оптоэлектроника Optoelectronics	BHK <i>VDS</i>			

Материал, полученный методом ВНК, имеет более низкую плотность дислокаций, но материал LEC обладает более однородным распределением дислокаций по площади пластины. Что касается электрически активных комплексов EL2, то кристаллы, полученные методом LEC, имеют более однородное распределение этих дефектов и, как следствие, более однородное распределение удельного сопротивления по площади пластины. Кроме того, монокристаллы, выращенные методом ВНК, имеют себестоимость выше, чем выращенные методом LEC. Это обусловлено меньшей скоростью кристаллизации (в 4-5 раз) и исключением операции повторного затравливания. Сравнивая совокупность характеристик, присущих различным методам выращивания, можно полагать, что в ближайшие годы оба метода будут присутствовать на рынке в приблизительно равных долях (табл. 2).

На основе арсенида галлия также изготавливают светодиоды (СД). Изобретение первых СД, излучающих монохроматический свет при подключении к источнику тока, относится к 1960-м годам. До 1980-х низкая яркость, отсутствие СД синего и белого цветов, а также высокие затраты на их производство ограничивали их применение — СД использовали в наружных электронных табло, ими оборудовали системы регулирования дорожного движения, применяли в оптоволоконных системах передачи данных и медицинском оборудовании. Появление сверхъярких, а также синих (в середине 1990-х годов) и белых СД (в начале XXI века) и постоянное снижение стоимости позволили использовать СД в качестве индикаторов режимов работы электронных устройств, в подсветке жидкокристаллических экранов различных приборов. Впоследствии применение светодиодов основных цветов (красного, синего и зеленого) позволило конструировать из них дисплеи с выводом полноцветной графики и анимации. Срок службы СД превышает в 6-8 раз долговечность люминесцентных ламп, относительная простота в работе с ними на этапе сборки изделий, отсутствие необходимости в регулярном обслуживании делают эти источники света более конкурентоспособными по сравнению с более традиционными — газоразрядными, люминесцентными лампами и лампами накаливания.

СД состоит из эпитаксиальных слоев GaAlAs, GaAsP или InGaAsP на подложке из GaAs либо GaP. СД из AlGaInP, GaAsP на подложках GaP излучают свет от бледно-зеленого до красного. СД из AlGaAs на подложках GaAs излучают свет от красного до инфракрасного. Светодиодная индустрия вступила в новый этап развития, что обусловлено выбором ярких и сверхъярких СД для создания систем общего освещения нового поколения, где они заменяют традиционные лампы накаливания и люминесцентные лампы. Всего в мире сегодня работают более 2500 реакторов для производства светодиодных структур методом эпитаксии металлоорганических соединений из газовой фазы (MOCVD-эпитаксии). Для обеспечения их работы используется 60...80 т галлия в год в виде металлоорганических соединений (триметилгаллий и др.) высокой чистоты и примерно такое же количество особочистого мышьяка [9].

### Рынок полупроводниковых изделий на основе GaAs

Основными производителями полупроводниковых изделий на основе арсенида галлия являются компании RFMD и Skyworks, Avago Technologies и TriQuint, SEI (Sumitomo Electric Industries), Sony, Panasonic и Mitsubishi Electric (ЕС, США, Япония), Win Semiconductor (Тайвань) [11-14]. Спецификой российского рынка является низкая, по сравнению с мировой, доля гражданского рынка. До недавнего времени основная потребность отечественных производителей радиоэлектронных и телекоммуникационных систем в СВЧ-ИС покрывалась за счет зарубежных поставок. При этом отечественные производители занимали на рынке нишу полупроводниковой продукции для военных устройств. В России промышленно выпускаемые и разрабатываемые СВЧ ИС на частоты выше 6 ГГц базируются на полевых транзисторах *MESFET*. В настоящее время в ИСВЧПЭ РАН и ряде других российских предприятий ведется работа по разработке и организации выпуска более современных СВЧ ИС, преимущественно для нужд обороннопромышленного комплекса [10]. Проекты находятся в различной стадии готовности.

Перспективы развития мирового и российского рынка GaAs достаточно благоприятны (рис. 4, см. третью сторону обложки).

Однако, несмотря на рост рынка арсенида галлия (рынок подложек GaAs к 2017 г., как ожидается, составит 3,6 млн кв. дюймов и 650 млн долл.), в физических показателях мировой рынок арсенида галлия останется достаточно малым по мировым меркам — до 700—1000 т/год. Для России эта цифра составит, видимо, 5—10 т/год, даже при полном замещении импорта и выполнении программ развития отечественной СВЧ-микроэлектроники до 2020 г.

Следует отметить, что в настоящее время в России нет промышленного производства полуизолирующего (ПИ) GaAs для СВЧ-применений. Потребности покрываются за счет импорта. В России осталось производство легированного GaAs для оптоэлектронных применений — ПП-GaAs произ-



Рис. 5. Динамика экспорта и импорта из РФ кристаллов и пластин GaAs по данным ФТС (в тыс. долл.): 1 — экспорт; 2 — импорт

Fig. 5. Dynamics of export and import from Russia of GaAs crystals and wafers according to the custom department (in thousand \$): 1 - export; 2 - import

водят в небольшом количестве в московском ОАО "Гиредмет" (Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности, предприятие госкорпорации Росатом), а также на зеленоградском предприятии "Элма-Малахит" [9, 10, 15].

Вместе с тем потребность отечественных предприятий в арсениде галлия растет. На рис. 5 приведена динамика экспорта и импорта кристаллов и пластин GaAs (таможенная стоимость по данным ФТС в тысячах долларов в год) [9].

Видно, что импорт в РФ GaAs растет. При этом абсолютные цифры поставок находятся в диапазоне до 1,5 т/год.

С 2015 г. АО "Росэлектроника" разрабатывает ряд проектов по промышленному выпуску пластин ПП-GaAs и ПИ-GaAs в России.

### Заключение

В средне- и долгосрочной перспективе данный сектор будет расти. На данный момент российский рынок специальных материалов для производства полупроводниковых соединений для электронно-компонентной базы (GaAs и др.) имеет незначительный объем и в ближайшей перспективе не достигнет уровня, необходимого для появления конкурентоспособного отечественного производителя, даже при условии выполнения программ импортозамещения. В то же время существует понимание, что для создания современной электронной компонентной базы в России необходимо развивать производства особо чистых соединений.

Представляется, что для этого необходимо использовать существующий и хорошо себя показавший механизм Федеральных целевых программ "Стратегические материалы". Необходимо только избавиться от соблазна экономии на этом разделе, когда программы государственной поддержки по сиюминутным экономическим причинам "включаются" с момента создания приборной структуры, минуя стадию получения полупроводниковых кристаллов и материалов для них.

### Список литературы

1. **Наумов А. В.** Обзор мирового рынка арсенида галлия // Изв. вузов, Материалы электронной техники. 2005. № 2. С. 20—25.

2. **Марков А. В.** Монокристаллы полупроводниковых соединений III—V: современное производство и перспек-

тивы его развития // Изв. вузов, Физика. 2003. № 6. С. 5—11.

3. **The GaAs** revolution. URL: http:// www.compoundsemiconductor.net/article/ 97973-the-gaas-revolution.html (дата обращения 21.12.2015).

4. GaAs wafer market to exceed 650 m by 2017 // Semi-conductor today. 2012. Vol. 7, is. 3. P. 100-101.

5. **GaAs** epi production to grow from 29,000 to 31,600 ksi over 2012—2017 // www.strategyanalytics.com (дата обращения 21.12.2015).

6. **GaAs** RF device revenue to grow from another record of \$7bn in 2015 to peak of \$8bn in 2018. URL: http://www.semiconductor-today.com/news\_items/2015/oct/strategy-analytics\_ 081015. shtml (дата обращения 21.12.2015).

7. **Market** trends in GaAs RF ICs. URL: http://www.semiconductor-today.com/features/PDF/SemiconductorToday\_Apr-May2011 SAGaAs.pdf (дата обращения 21.12.2015).

8. **Zhang Jie.** Gallium arsenide industry development study Current Climate and Future Prospects for the Gallium Market // Electronic Metals Conference, Гуаньчжоу, сентябрь, 2012. URL: http://conferences.metal-pages.com/papers/electronic-metals-2012/ (дата обращения 21.04.2016).

9. Гасанов А. А., Наумов А. В., Петров И. М. Россия на мировом рынке мышьяка и его соединений // Минеральные ресурсы России. 2016. № 1–2. С. 6–12.

10. **Мальцев П. П.** Полупроводниковая СВЧ-электроника в России. Институт СВЧПЭ РАН — исследования и разработки // Электроника НТБ. 2015. № 10. С. 114—122.

11. **Global** and China GaAs-based Device Market. URL: http://www.powerwaywafer.com/Global-and-China-GaAs-based-Device-Market.html (дата обращения 21.04.2016).

12. **GaAs** bulk substrate market revenue shrank 8 % in 2013. URL: http://www.semiconductor-today.com/news\_items/2014/ JUL/STRATEGYANALYTICS\_210714.shtml (дата обращения 21.04.2016).

13. **Military** GaAs device market to grow at CAGR of 13 % to over \$0.5bn by 2018. URL: http://www.semiconductor-today. com/news\_items/2014/OCT/STRATEGY-ANALYTICS\_

161014.shtml (дата обращения 21.04.2016).

14. **Compound** semiconductor industry continues growths // Semiconductor Today. Compounds & Advanced Silicon. 2011. Vol. 6, Is. 5. P. 114–117.

15. **Новые** проекты Зеленоградского кластера. URL: http://www.russianelectronics.ru/developer-r/news/russianmar-ket/doc/73391/ (дата обращения 21.09.2016).

N. A. Kulchitskiy, D. Sc., Professor, Leading Researcher, e-mail: n.kulchitsky@gmail.com;

Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation,

Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454, Russian Federation,

E. P. Mayanov, General Director, A. V. Naumov, Analyst-Researcher,

Federal State Research and Design Institute of Rare Metals Industry, Moscow, 119017, Russian Federation *Corresponding author:* 

**Kulchitskiy Nikolay A.,** D. Sc., Professor, Leading Researcher, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation, Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: n.kulchitsky@gmail.com

### Gallium Arsenide: the Basic Material of Microwave Electronics

Received on December 12, 2016 Accepted on January 11, 2017

The analysis of the current state of the market and GaAs-based devices. One of the fastest growing segments of microwave microelectronics is an integrated circuit (IC) on GaAs for mobile telephony. In the last decade, the mobile market is showing rapid growth. Therefore, the global market for gallium arsenide is booming. The market for GaAs substrates by 2017, according to forecasts, will amount to 3.6 million sq inch and 650 million \$. It is noted that currently the Russian market of materials (GaAs, etc.) is very small and, in the short term will not reach the level required for the emergence of a globally competitive domestic producers. The specifics of the Russian market is low compared to the world, the share of the civilian market of microelectronics. Until recently, a major demand of domestic manufacturers of electronic and telecommunication systems was covered by foreign supplies. While national manufacturers have occupied a niche in the market of semiconductor products for military devices, whose use precludes the use of imported components. From 2015, there are projects under the auspices of Roselektronika with the participation of several institutions for the production of GaAs wafers. At the same time, there is an understanding that the creation of modern electronic component base in Russia it is necessary to develop production of high pure compounds. It appears that it is necessary to use an existing and well-behaved showing a mechanism of Federal target programs "Strategic materials".

Keywords: gallium arsenide, market, prices, consumption, demand, raw material reserves, high purity gallium and arsenic

### For citation:

Kulchitskiy N. A., Mayanov E. P., Naumov A. V. Gallium Arsenide: the Basic Material of Microwave Electronics, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 207–214.

DOI: 10.17587/nmst.19.207-214

### Gallium arsenide (GaAs): the basic material of microwave electronics

Studies of GaAs properties started in USA under the aegis of the US *Department of Defense* (DoD) in the mid-60s of XX century. The studies resulted in the development of fast-response integrated circuits (ICs) used in "intelligent"(smart) fire control systems and supercomputers. DoD financed the program of IC of MIMIC (*Microwave/Millimeter Wave Monolithic Integrated Circuit*) type development; later on, MIMIC program was replaced with a MAFET program, the one of *Microwave Analog Front End Technology* development (Fig. 1).

Production of GaAs ICs consists mostly of the manufacture of devices with p-n Junction Field-Effect Transistors (JFET), field-effect transistors with Schottky gate (MESFET, Metal Semiconductors Field Effect Transistor), and GaAs Pseudomorphic High Electron Mobility Transistors (GaAs PHEMT).

The cost of PHEMT devices has been reduced considerably with the industry mastering treatment of GaAs wafers with the diameter of 150 mm. The fall in price resulted in PHEMS equipment becoming popular across numerous application areas from mobile phones and base stations to radars and millimeter-range communications systems [1, 2].

Main types of GaAs-based devices are presented in Table 1 and Fig. 2 (see the 3-rd side of cover) [3-8].

### GaAs single crystal production methods

Following materials are the most widely used in electronics:

1. Semi-insulating (SI) GaAs with high specific resistance ( $10^7 \Omega \cdot cm$ ). The material is used in microwave IC and discrete microelectronic device production. The high specific resistance of SI-GaAs is explained by midgap Fermi level being pinned due to the existence of a deep donor center known as EL2 related to the intrinsic antisite defects of GaAs. Residual carbon admixture atoms and the antisite GaAs defects play the role of compensating shallow acceptors. SI-GaAs monocrystals should also demonstrate a high carrier mobility and high macro- and microscopic homogeneity of properties distribution over cross-sections and along the ingot's length.

2. *n*-Type Si-doped GaAs (SC) with low dislocation density. Heavily Si-doped  $(10^{17}...10^{18} \text{ cm}^{-3})$  GaAs single crystals should possess a perfect enough crystal structure. Crystals with the dislocation density  $N_D < 10^4 \text{ cm}^{-2}$  are considered to be fit for light diode production, while those with the density  $N_D < 2 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2}$  are used in laser production. The material is used in optoelectronics for injection lasers, light- and photodiodes and photocathodes production. The crystals serve a material for microwave generators; they are also used for the manufacture of tunnel diodes capable of operation at higher temperatures than silicon-based ones and on higher frequencies than germanium-based ones.

3. GaAs crystals doped with chromium. The material is applied in infrared optics.

4. Zinc- or tellurium-doped GaAs single crystals are used in optoelectronic device production.

Initial polycrystalline GaAs is usually obtained by arsenic vapors reaction with metal gallium in a sealed quartz ampoule at high temperature. As a rule, a container with arsenic located at the end of the ampoule is heated up to 891 K, which leads to arsenic vapors pressure in the ampoule reaching 1 atm necessary for stoichiometric GaAs formation. Arsenic vapors interact with metal gallium placed at the other end of the ampoule in a boat made of quartz or pyrolytic boron nitride (PBN) at 1511 K. After the reaction is completed, a charge of polycrystalline GaAs is obtained.

For GaAs single crystal industrial growth, they use Czochralski method based on melt liquid encapsulation (*Liquid Encapsulated Czochralski* — LEC) with a layer of boron anhydride, horizontal directional solidification method in its two versions: *Horizontal Bridgman* (HB) or crystallization in moving temperature gradient (*Horizon-tal Gradient Freeze* — HGF), and vertical directional solidification (VDS) method in the same two versions: *Vertical Bridgman* (VB) or *Vertical Gradient Freeze* — VGF).

Czochralski crystal puller is charged with a polycrystalline GaAs ingot in a crucible with an external graphite element. GaAs is melted at about 1511 K, and a crystal is pulled in an inert atmosphere under pressure varying from units to 100 atm. Gallium arsenide melt is covered with liquid boron oxide  $(B_2O_3)$  to prevent melt decomposition. In Fig. 3, dynamics of Czochralski method development is presented as regards an increase in both charge amount and the diameter of the grown crystal.

Over four decades, the diameter of GaAs wafers produced by the microwave industry increased from 50 to 150 mm; each passage for a greater diameter yielded minimum 20 to 25 % decrease in a device production cost. Wafers with the diameter of 150 mm are the ones mainly used in industry. The use of these wafers is expected to be continued up to the year 2020, due to considerable investments WIN Semiconductor, a major producer from Taiwan, has made into modernization and new foundries construction for 150-mm wafers production. It should be mentioned that industry tends toward the development of 200-mm wafers fabrication technology, the pilot 200-mm wafer production is expected to be realized by the end of 2018. Stanford University researchers work at the development of a technology to produce devices operating on 200-mm GaAs wafers.

A new trend has appeared in the development of VGH method of GaAs single crystals growing: transition to a semicontinuous multi-pulling technique.

### Use of GaAs in electronic device production

Certain GaAs single crystal growing techniques applicability for various electronic devices fabrication is presented in Table 2.

The dislocation density of the material obtained by VDS technique is lower than that of the material produced by LEC technology, but the latter has more even dislocation distribution over the wafer area. As to electrically active EL2 complexes, defect distribution over the wafer area and, consequently, that of specific resistance are more homogeneous in LEC crystals. Besides, the production cost of monocrystals obtained by VDS method is higher than that of wafers produced by LEC technique. This is due to 4 to 5 times lower crystallization rate and avoidance of repeated seeding in a case of LEC technology use. Comparison of properties of the products obtained by these methods enables us to believe that the market shares of the both methods will be about equal in the next few years (Table 2).

Gallium arsenide is used also in light diode (LED) production. Initially, light diodes emitting monochromatic light on connection to a current source were invented in the 60s of the last century. Up to the 80s, the light diode application was limited by their low brightness, the absence of white- and blue LEDs, and a high cost of production. LEDs were used in outdoor light panels and in traffic regulation systems' equipment; they also used the first LEDs in fiber-optic data transmission systems and medical equipment. The appearance of super bright and blue diodes (in mid90s), as well as white ones (in the beginning of XXI c) and constant decrease in prices, made it possible to use light diodes in electronic device's operation mode indicators and for various devices' LCD screen backlights. Later on, the use of primary-color LEDs (red, blue, and green ones) provided the possibility to build displays supporting full-color graphics and animation.

Life time of LEDs being 6 to 8 times longer than that of luminescent lamps, comparative easiness of assemblage, the absence of the need for regular maintenance — all these make LEDs more competitive than traditional light sources: gas-discharge luminescent and incandescent lamps.

LED consists of GaAlAs-, GaAsP-, or InGaAsP epitaxial layer on a GaAs- or GaP wafer. LEDs with Al-GaInP- or GaAsP on a GaP wafer emit light within the range from pale-green to red; radiation of LEDs with AlGaAs on a GaAs wafer occupy the red (visible) to in-frared part of the spectrum.

LED industry has entered a new phase of development due to the use of bright and super bright LEDs for new-generation general lighting systems, where they have replaced traditional incandescent and gas-discharge luminescent lamps. All in all, more than 2500 reactors for light-emitting diode structures fabrication by the method of organometallic compounds epitaxy from gas phase, or metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD epitaxy), presently work across the globe. To maintain their operation, 60 to 80 tons of Ga as high-purity organometallic compounds (trimethylgallium etc.) and about the same quantity of high-purity arsenic are used [9].

### Market of GaAs-based semiconductor products

Major producers of GaAs-based semiconductor items are RFMD and Skyworks, Avago Technologies and TriQuint, SEI (Sumitomo Electric Industries), Sony, Panasonic and Mitsubishi Electric (EU, USA, Japan), and Win Semiconductor (Taiwan) companies [11-14]. The feature of the Russian market is a small share of civil market, as compared to that in the world market. The main demand of domestic radioelectronic and telecommunications system producers for SHF ICs was satisfied by foreign suppliers, while the domestic producers occupied the niche of semiconductor products for military equipment. Microwave integrated circuits operating at frequencies exceeding 6 GHz produced and engineered by Russian industry are based on MESFET field-effect transistors. Development and organization of production of up-to-date microwave integrated circuits (intended mostly for the defense-industrial sector) are under way at the Institute for Microwave Semiconductor Electronics RAS and some other Russian enterprises [10], the projects being in different stages of implementation.

Prospects of global and Russian GaAs markets development are rather favorable (Fig. 4, see the 3-rd side of cover). Nevertheless, despite the growth of GaAs market (GaAs wafer market is expected to reach 3.6 million square inches and \$650 M), the world GaAs market will keep being rather small, if expressed with physical parameters, that is, it will make up to 700—1000 tons per year (TPY). For Russia the market size apparently will be 5 to 10 TPY, even provided the whole import substitution takes place and programs of domestic microwave electronics development by 2020 are realized.

It should be noted that there is no domestic production of SI-GaAs for microwave purposes. The demand for it is satisfied with imports. In Russia, doped GaAs production remains active as a small-scale semiconductor GaAs production at GIREDMET (Federal State Research and Design Institute of Rare Metal Industry of Rosatom State Corporation, Moscow) and at Elma-Malakhit enterprise (Zelenograd) [9, 10, 15]. Meanwhile, Russian enterprises need more and more GaAs. Dynamics of GaAs crystals and wafers export/import is presented in Fig. 5 (customs value, thousand USD per year, according to the Federal Customs Service's data) [11-14].

GaAs Importation to Russia is obviously growing, the absolute volume of delivery making up to 1.5 TPY.

Ruselectronics JSC has been realizing a number of projects on both semiconducting (SC) GaAs and SI-GaAs wafers industrial production in Russia since 2015.

### Conclusion

The considered sector will grow in both mediumand long-term outlooks. Russian market of special materials necessary for the production of compound sem-

iconductors for electronic components (GaAs etc.) has a small value and it is unlikely to reach the level necessary for the competitive domestic producer to emerge, even provided the import substitution programs are realized. At the same time, there exists an understanding that the creation of modern electronic component base in Russia is necessary to develop the high purity substance production. It looks reasonable to use the existing and well-behaved mechanism of the Federal target programs "Strategic materials". It is urgent that the temptation of saving funds at the expense of this part of the Program be overcome now, when due to momentary economic reasons, Government support programs are put into action at the moment of instrument structure design, escaping stages of semiconductor crystaland the related material fabrication.

### References

1. **Naumov A. V.** Obzor mirovogo rynka arsenida gallija, *IZV Vuzov, Materialy electronnoy techniki*, 2005, no. 2, pp. 20–25 (in Russian)

2. **Markov A. V.** Monokristally poluprovodnikovyh soedinenij III–V: sovremennoe proizvodstvo i perspektivy ego razvitiya, *IZV Vuzov, Fizika*, 2003, no. 6, pp. 5–11 (in Russian).

3. **The GaAs** revolution, http://www.compoundsemiconductor.net/article/97973-the-gaas-revolution.html (date of access 21.12.2015).

4. GaAs wafer market to exceed \$650 m by 2017, Semiconductor today, 2012, vol. 7, is. 3, pp. 100–101.

5. **GaAs** *epi production to grow from 29,000 to 31,600 ksi over 2012–2017*, www.strategyanalytics.com (date of access 2121.12.2015).

6. **GaAs RF** device revenue to grow from another record of \$7bn in 2015 to peak of \$8bn in 2018, http://www.semiconductor-to-day.com/news\_items/2015/oct/strategy-analytics\_081015.shtml (date of access 21.12.2015).

7. **Market** trends in GaAs RF ICs, http://www.semiconductortoday.com/features/PDF/SemiconductorToday\_AprMay2011\_ SAGaAs.pdf (date of access 21.12.2015).

8. **Zhang Jie.** Gallium arsenide industry development study Current Climate and Future Prospects for the Gallium Market, *Electronic Metals Conference, Guanchzou, September, 2012* (accessed 21.04.2016).

9. Gasanov A. A., Naumov A. V., Petrov I. M. Rossiya na mirovom rynke mysh'yaka i ego soedinenij, *Mineral'nye resursy Rossii*, 2016, no. 1–2, pp. 6–12 (in Russian).

10. **Mal'tsev P. P.** Poluprovodnikovaya SVCH-ehlektronika v Rossii. Institut SVCHPE RAN — issledovaniya i razrabotki, *Elektronika NTB, 2015*, no. 10, pp. 114–122 (in Russian).

11. **Global** and China GaAs-based Device Market, http://www.powerwaywafer.com/Global-and-China-GaAs-based-Device-Market.html (date of access 21.04.2016).

12. **GaAs** *bulk substrate market revenue shrank 8 % in 2013*, http://www.semiconductor-today.com/news\_items/2014/JUL/ STRATEGYANALYTICS\_210714.shtml (accessed 21.04.2016).

13. **Military** *GaAs device market to grow at CAGR of 13* % *to over \$0.5bn by 2018*, http://www.semiconductor-today.com/ news\_items/2014/OCT/STRATEGY-ANALYTICS\_161014.shtml (accessed 21.04.2016).

14. **Compound** semiconductor industry continues growth, *Semiconductor Today. Compounds & Advanced Silicon, June/July,* 2011, vol. 6, is. 5, pp. 114–117.

15. **Novye** proekty Zelenogradskogo klastera, http://www.russianelectronics.ru/developer-r/news/russianmarket/doc/73391/ (accessed 21.04.2016). Г. А. Мустафаев, д-р техн. наук, проф., Д. Г. Мустафаева, канд. техн. наук, доц., e-mail: dzhamilya79@yandex.ru, М. Г. Мустафаев, канд. техн. наук, ассистент ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет)", г. Владикавказ

## ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХАЛЬКОГЕНИДОВ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРВОЙ ГРУППЫ

Поступила в редакцию 22.01.2017

Влияние облучения высокоэнергетичными электронами на параметры халькогенидов элементов первой группы показывает, что электропроводность и коэффициент термоЭДС не изменяются до определенной дозы, затем с увеличением дозы облучения электропроводность уменьшается, а коэффициент термоЭДС увеличивается. Облучение высокоэнергетичными электронами позволяет совершенствовать свойства соединений халькогенидов элементов первой группы и оптимизировать их термоэлектрические параметры.

Ключевые слова: материал, добротность, структура, отжиг, дефект, облучение, свойство, концентрация, параметр

### Введение

В последние годы получили практическое применение технологические процессы обработки материалов, структур и приборов потоками проникающей и непроникающей радиации. Носителями энергии в этих процессах являются быстрые частицы (ионы, электроны, иногда нейтроны), а также кванты рентгеновского и оптического излучений. Технологические процессы радиационной обработки, происходящие без заметного нагрева образца, инициируются воздействием ускоренных ионов и электронов или ү-излучением. Воздействие связано с образованием радиационных нарушений и стимуляцией химических реакций. Большинство процессов радиационной обработки основано на образовании в структурах радиационных нарушений [1-3].

### Радиационное легирование соединений

По характеру технологического воздействия существуют две группы процессов:

- контролируемое введение радиационных нарушений на стадии изготовления отдельных элементов структуры, совершаемое локально с использованием различных масок;
- управление электрическими параметрами готовых приборов, совершаемое после их герметизации или перед нею сплошными потоками быстрых частиц, облучающих весь прибор или структуру.

Получение тех или иных свойств материалов происходит путем контролируемого введения в кристалл дефектов решетки определенного типа. Образующиеся под действием проникающего излучения радиационные дефекты электрически ведут себя аналогично донорам и акцепторам, имеющим химическую природу. В связи с этим можно использовать радиационное легирование сплавов для изменения их свойств. Проникающее излучение приводит к устойчивым изменениям характеристик материалов, которые сохраняются в рабочем диапазоне температур. Совершенствование свойств материалов на основе халькогенидов элементов первой группы и повышение их термоэлектрической эффективности, которая является основным параметром, определяющим характеристики преобразователя и области их применения, обусловлено увеличением требований и необходимостью повышения эффективности преобразователей при эксплуатации.

При облучении материалов частицами высоких энергий в них возникает большое разнообразие структурных нарушений, часть которых восстанавливается (отжигается) сразу после прекращения облучения, а часть представляет собой устойчивые образования, сохраняющиеся долгое время, и их разрушение происходит лишь при высокотемпературном нагревании кристаллов. После взаимодействия излучения с веществом материала в последнем в первую очередь появляются простейшие точечные радиационно-структурные дефекты изолированные вакансии (акцепторы) и междоузельные атомы (доноры). Следующим шагом является их взаимодействие с атомами остаточных и легирующих примесей. В результате этого взаимодействия происходит образование сложных устойчивых комплексов. Возможность образования таких комплексов обусловливается большой подвижностью компонент пар Френкеля, а также наличием барьера для аннигиляции вакансий и междоузельных атомов.

Скорость образования радиационных центров зависит от условий облучения (вид энергии, интегральный поток и интенсивность излучения, температура) и от исходного состояния кристалла (тип проводимости, концентрация носителей, плотность дислокации). Естественно, что, изменяя условия облучения и исходное состояние материала, можно управлять кинетикой накопления радиационных центров и изменять свойства материала.

Свойства реальных кристаллов (электро- и теплопроводность) связаны с присутствием атомных точечных дефектов. Поэтому изменение числа дефектов под действием проникающей радиации ведет к изменению основных электрофизических параметров материалов [4, 5]. Типы радиационных нарушений и их влияние на основные свойства облучаемых кристаллов зависят от структуры решетки, строения энергетических зон, а также от природы и энергии бомбардирующих частиц.

# Влияние облучения на электрофизические свойства соединений

Изменение электрофизических параметров материалов под действием проникающей радиации позволяет направленно изменять электрические параметры приборов.

Экспериментальные результаты исследований влияния облучения высокоэнергетичными электронами на параметры халькогенидов меди и серебра показали, что электропроводность и коэффициент термоЭДС не изменяются в пределах погрешности измерений до доз порядка 10<sup>16</sup> эл/см<sup>2</sup>, затем электропроводность уменьшается с увеличением дозы облучения, а коэффициент термоЭДС увеличивается. Слабая зависимость электропроводности и коэффициента термоЭДС от дозы до 10<sup>16</sup> эл/см<sup>2</sup> свидетельствует о динамичном равновесии между процессом образования радиационных дефектов и их аннигиляцией в процессе отжига. Так как материал, содержащий дефекты радиационного происхождения, представляет собой неустойчивую систему, то при температуре, отличной от нуля, будет происходить отжиг радиационных дефектов. При дальнейшем увеличении потока электропроводность и коэффициент термоЭДС изменяются за счет компенсации акцепторных центров донорами, создаваемыми в процессе облучения образцов. При облучении электронами с энергией до 10 МэВ образуются точечные дефекты — вакансии и междоузельные атомы. Образованию точечных дефектов при облучении свидетельствует и тот факт, что теплопроводность уменьшается с увеличением потока в результате повышения рассеяния фононов на дефектах.

При облучении образуются, по-видимому, и нейтральные дефекты, представляющие собой комплексы вакансия — донор. В процессе облучения концентрации компенсирующих доноров увеличиваются и соответственно уменьшаются концентрации акцепторов. Однако доминирующим процессом является уменьшение концентрации акцепторных центров. Следовательно, причиной уменьшения концентрации носителей заряда является не простая компенсация акцепторных состояний донорными, а потеря акцепторами своей электрической активности.

Для стабилизации параметров исследуемых соединений проводится отжиг. В процессе отжига, который начинается с распада наиболее слабосвязанных комплексов, наряду с аннигиляцией вакансий и междоузельных атомов идет процесс их перевода в более устойчивое состояние. Последний следует рассматривать как переход системы в новое квазиравновесное состояние, соответствующее данной температуре отжига. Рекомбинация вакансий и междоузельных атомов из-за кулоновского взаимодействия между ними приводит к уменьшению концентрации изолированных вакансий, способных участвовать в комплексообразовании, в результате чего наблюдается уменьшение концентрации вводимых облучением центров.

Исходя из того, что система подвижных первичных дефектов и электронно-дырочный газ должны прийти к квазиравновесию, которое характеризуется минимумом свободной энергии, то в широкозонных материалах минимум свободной энергии достигается за счет понижения энергии системы при захвате носителей заряда на уровни дефектов, образующихся при облучении. В материале *р*-типа для установления квазиравновесия необходимо преимущественное образование дефектов с донорными уровнями, наиболее близкими к зоне проводимости. По мере приближения к собственной зоне скорость накопления дефектов данного типа падает, так как уменьшается выигрыш энергии, обусловленный переходом свободных носителей заряда на уровни дефектов, и, вследствие этого, в широкозонных материалах халькогенидов меди инверсия типа проводимости не наступает.

Повышения эффективности можно достичь также путем выбора оптимального интервала рабочих температур для данного материала. При изменении температуры в области примесной проводимости концентрация носителей заряда сохраняется постоянной (предполагается, что примесные уровни полностью ионизированы) и, следовательно, сохраняются условия достижения максимальной эффективности материала при концентрации носителей заряда, равной оптимальной концентрации. Поэтому с достаточно хорошей точностью величину теплопроводности можно рассматривать просто как теплопроводность решетки.

### Заключение

Проведенные исследования и анализ показывают, что совершенствование свойств материалов для пленочных преобразователей сводится к получению максимального значения термоэлектрической добротности, которая является основным параметром, определяющим характеристики термоэлектрического материала. Облучение высокоэнергетичными электронами позволяет совершенствовать свойства соединений халькогенидов элементов первой группы и оптимизировать их термоэлектрические параметры.

### Список литературы

1. Вавилов В. С., Ухин Н. А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Атомиздат, 1969. 312 с.

2. **Курносов А. И., Юдин В. В.** Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Высшая школа, 1986. 386 с.

3. **Ладыгин Е. А.** Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. М.: Советское радио, 1980. 224 с.

4. Кумахов М. А., Ширмер Г. Атомные столкновения в кристаллах. М.: Атомиздат, 1980. 192 с.

5. Смирнов Л. С. Радиационные эффекты в полупроводниках. Новосибирск: Наука, 1979. 224 с.

G. A. Mustafaev, Professor, D. G. Mustafaeva, Associate Professor, dzhamilya79@yandex.ru, M. G. Mustafaev, Assistant,

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, 362045, Russian Federation

Corresponding author:

**Mustafaeva Dzhamilya G.,** Associate Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, 362045, Russian Federation, e-mail: dzhamilya79@yandex.ru

## Influence of Ionizing Radiation on the Electrophysical Properties of Chalcogenides Elements of the First Group

Received on January 22, 2017 Accepted on February 08, 2017

Obtaining of those or other material properties takes place by controlled introduction of defects in the crystal lattice of a particular type. Penetrating radiation leads to changes in electrophysical parameters of the basic materials and produce sustainable change of their characteristics, which are saved in the working temperature range. Influence of irradiation with high-energy by electrons on the parameters of chalcogenides elements of the first group shows that the value of the electrical conductivity and the thermoelectric coefficient does not are changed to a certain dose, and then with increasing radiation dose decreases the electrical conductivity, and thermoelectric coefficient increases. Irradiation with high-energy by electrons allows to improve the properties of chalcogenides compounds of elements of the first group, and optimize their thermoelectric parameters.

Keywords: material, quality factor, structure, annealing, defect, irradiation, property, the concentration, parameter

### For citation:

**Mustafaeva G. A., Mustafaeva D. G., Mustafaeva M. G.,** Influence of Ionizing Radiation on the Electrophysical Properties of Chalcogenides Elements of the First Group, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 215–218.

DOI: 10.17587/nmst.19.215-218

### Introduction

The technological processes for processing of materials, structures and devices by the flows of the penetrating and nonpenetrating radiation got practical application. The energy carriers are the fast particles (ions, electrons, sometimes neutrons), and also the quanta of the x-ray and optical radiations. The technological processes of the radiation processing occurring without an appreciable heating of the samples are initiated by the influence of the accelerated ions and electrons, or  $\gamma$ -radiation. The influence is connected with formation of the radiation deffects and stimulation of the chemical reactions. Most of the processes of the radiation processing are based on formation of the radiation deffects in the structures [1-3].

### Radiation doping of the compounds

By the character of the influence the processes can be divided into two groups:

- controllable introduction of the radiation deffects at the stage of manufacturing of the separate elements of the structure, implemented locally with the use of various masks;
- control of the electric parameters of the ready devices, implemented after their hermetic sealing or before it by the continuous flows of the fast particles irradiating a device or a structure.

The properties of the materials are obtained under a controllable introduction of certain lattice defects into a crystal. The electric behavior of the radiation defects formed under the influence of the penetrating radiation is similar to that of the donors and the acceptors having a chemical nature. In this connection it is possible to use the radiation doping of alloys for changing of their properties. The penetrating radiation leads to stable changes of the characteristics of the materials, which remain within the working range of temperatures. Improvement of the properties of the materials on the basis of the chalcogenide elements of the first group and increase of their thermoelectric efficiency, which is a key parameter defining the characteristics of a transducer and the areas of their application, is due to the higher requirements and the necessity to increase the efficiency of the transducers.

Irradiation of the materials by the high-energy particles causes a variety of the structural deffects in them, some of which are restored (annealed) after termination of the irradiation, while some of them become the steady formations remaining for a long time, and their destruction occurs only at a high-temperature heating of the crystals. After interaction of the radiation with a material substance in the latter first of all elementary dot radiation-structural defects - isolated vacancies (acceptors) and interstitial atoms (donors) appear. The next stage is their interaction with the atoms of the residual and alloying impurities. As a result of the interaction, formation of the steady complexes occurs. Feasibility of their formation is due to a high mobility of the components of Frenkel pairs, and also presence of a barrier for annihilation of the vacancies and the interstitial atoms.

The speed of formation of the radiation centers depends on the irradiation conditions (kind of energy, integral flow and intensity of radiation, temperature) and on the initial state of a crystal (conductivity type, concentration of the carriers, disposition density). It is natural, that, by changing the conditions of irradiation and the initial state of a material it is possible to control the kinetics of accumulation of the radiation centers and to change the properties of a material.

The properties of the real crystals (electric and heat conductivities) are connected with the presence of the atomic point defects. Therefore, a change of the number of defects under the influence of the penetrating radiation leads to a change of the basic electrophysical parameters of the materials [4, 5]. Types of radiation deffects and their influence on the basic properties of the crystals depend on the structure of the lattice and of the energy zones, and the nature and energy of the bombarding particles.

# Influence of irradiation on the electrophysical properties of the compounds

Change of the electrophysical parameters of the materials under the influence of a penetrating radiation allows us to control the change of the electric parameters of the devices.

The results of the research of the influence of the irradiation by high-energy electrons on the parameters of the chalcogenides of copper and silver demonstrate, that the electroconductivity and the thermoelectric coefficient do not change within a possible error of measurements up to the doses of about  $10^{16}$  el/cm<sup>2</sup>, then the electroconductivity decreases with an increase of the dose of irradiation, while the thermoelectric coefficient increases. Weak dependence of the electroconductivity and of the thermoelectric coefficient on a dose below  $10^{16}$  el/cm<sup>2</sup> testifies to a dynamical balance between the formation of the radiation defects and their annihilation during annealing. Since the material containing the defects of a radiation origin is an unstable system, at the temperature, which is different from zero, an annealing of the radiation defects occurs. At a further increase of the flow the electroconductivity and the thermoelectric coefficient change due to the compensation for the acceptor centers by the donors created during the irradiation of the samples. During irradiation by the electrons with energy up to 10 MeV the point defects - the vacancies and interstitial atoms are formed. The formation of the point defects testifies to the fact that the heat conductivity decreases with a flow increase at a higher scattering of the phonons on the defects.

Apparently, during the irradiation the neutral defects are also formed, representing the vacancy-donor complexes. During irradiation the concentration of the compensating donors increases and the concentrations of the acceptors decrease. However, the diminishing concentration of the acceptor centers plays the dominating role. Hence, the reason for reduction of the concentration of the charge carriers is not a simple compensation for the acceptor states by the donor ones, but the loss of the electric activity by the acceptors.

For stabilization of the parameters of the investigated compounds an annealing is done. During the annealing, which begins with a disintegration of the most loosely coupled complexes, alongside with the annihilation of the vacancies and interstitial atoms, their transfer to a steadier state occurs. The latter should be considered as a transition of the system into a new quasi-equilibrium state corresponding to the given temperature of annealing. A recombination of the vacancies and the interstitial atoms because of Coulomb interactions between them leads to a reduction of the concentration of the isolated vacancies, capable to participate in the complex formation. As a result there is a reduction of the concentration of the centers introduced by the irradiation.

Recognizing that the system of the mobile primary defects and the electron-hole gas should come to a quasi-equilibrium characterized by a minimum of free energy, in the wide-band materials the minimum of the free energy is reached due to a fall of energy of the system during capture of the charge carriers on the levels of the defects formed during irradiation. In a material of *p*-type the quasi-equilibrium demands primary formation of the defects with the donor levels closest to the zone of conductivity. While approaching the own zone the speed of accumulation of the defects of the given type falls, because the gain of energy caused by transition of the free charge carriers to the levels of defects, and thereof, in the wide-band materials of chalcogenides of copper, the inversion of the type of conductivity does not occur.

Higher efficiency can also be reached by selection of the optimal interval of the working temperatures for a material. At a change of the temperature in the area of the impurity conductivity the concentration of the charge carriers remains constant (it is assumed, that the impurity levels are completely ionized) and, hence, the conditions are preserved for achievement of the peak efficiency of a material at the concentration of the charge carriers equal to the optimal concentration. Therefore, with a good enough reason the heat conductivity can be considered as the heat conductivity of a lattice.

### Conclusion

The carried out research and the analysis show, that improvement of the properties of the materials for the film transducers boils down to obtaining of the maximal thermoelectric good quality, which is a key parameter defining the characteristics of a thermoelectric material. An irradiation by high-energy electrons allows us to improve the properties of the compounds of the chalcogenide elements of the first group, and to optimize their thermoelectric parameters.

### References

1. Vavilov V. S., Uhin N. A. Radiacionnye jeffekty v poluprovodnikah i poluprovodnikovyh priborah, Moscow, Atomizdat, 1969. 312 p. (in Russian).

2. Kurnosov A. I., Judin V. V. Tehnologija proizvodstva poluprovodnikovyh priborov i integral'nyh mikroshem, Moscow, Vysshaja shkola, 1986, 386 p. (in Russian).

3. Ladygin E. A. Dejstvie pronikajushhej radiacii na izdelija jelektronnoj tehniki, Moscow, Sovetskoe radio, 1980, 224 p. (in Russian).

4. Kumahov M. A., Shirmer G. Atomnye stolknovenija v kristallah, Moscow, Atomizdat, 1980, 192 p. (in Russian).

5. **Smirnov L. S.** *Radiacionnye jeffekty v poluprovodnikah,* Novosibirsk: Nauka, 1979, 224 p. (in Russian).

УДК 621.382

DOI: 10.17587/nmst.19.219-226

**А. А. Трофимов**, мл. науч. сотр., e-mail: aa-trofimov@yandex.ru, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, г. Москва

# ОПТИМИЗАЦИЯ ТОЛШИНЫ ПОДЛОЖКИ ПРИБОРНЫХ ПЛАСТИН САПФИРА И КАРБИДА КРЕМНИЯ

Поступила в редакцию 11.11.2016

Проведены работы по оптимизации толщины подложки приборных пластин сапфира и карбида кремния с изготовленными на них сверхвысокочастотными монолитными интегральными схемами (СВЧ МИС). Установлен оптимальный диапазон толщины подложки приборных пластин сапфира и карбида кремния, исходя из тепловыделения СВЧ МИС и деформации пластины вследствие внутренних напряжений, вызванных рассогласованием кристаллических решеток материала подложки и выращенного на подложке слоя GaN.

**Ключевые слова:** приборные пластины сапфира и карбида кремния, СВЧ МИС, толщина подложки приборных пластин

### Введение

Преимущества и перспективность СВЧ технологий и приборов на основе GaN в настоящее время признаны многими отечественными и зарубежными учеными [1—8]. Сверхвысокочастотные монолитные интегральные схемы (СВЧ МИС) на основе нитрида галлия (GaN) способны работать в широком температурном диапазоне и в жестких радиационных условиях, что в первую очередь важно для космической промышленности, атомной энергетики и военного применения. В настоящее время материалами для подложек при производстве радиационно стойких СВЧ МИС на нитридных гетероструктурах являются сапфир и карбид кремния. СВЧ приборы на основе GaN гетероструктур

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, Том 19, № 4, 2017 —

имеют высокую удельную мощность, что требует эффективного теплоотведения для работающего изделия. Этому способствует уменьшение толщины подложки, выполняемое с помощью шлифования и полирования. Однако свойства нитридов принципиально отличаются от свойств других полупроводников. Так, плотность дислокаций (линейных нарушений структуры, связанных с разницей параметров решетки материала подложки и выращенного на ней слоя GaN и коэффициентов термического расширения, а также присутствием механических напряжений в структуре) в нитридах на пять порядков величины выше, чем, скажем, в арсениде галлия [9]. Упругие напряжения в выращенном на подложке слое GaN, неизбежно возникающие вследствие рассогласования кристаллических решеток GaN и подложки, при уменьшении толщины подложки возрастают обратно пропорционально толщине подложки, что затрудняет работу с пластиной на различных этапах и способно привести к разрушению приборной пластины.

Таким образом, задача заключается в оптимизации толщины подложки приборных пластин сапфира и карбида кремния исходя из тепловыделения приборов и деформации пластины вследствие внутренних напряжений.

### Распределение температуры СВЧ МИС в зависимости от материала и толщины подложки

Работу СВЧ МИС в терминах теплопередачи можно описать как процесс генерации теплоты внутренним тепловым источником, процесс переноса теплоты в среде, а также диссипацией теплоты [10]. СВЧ МИС представляет собой малошумящий усилитель, выполненный по двухкаскадной схеме [11, 12]. В тепловой модели транзистора источником теплоты является подзатворная часть

Материал <i>Material</i>	Функция в модели Function in the model	Плот- ность, кг/м <sup>3</sup> Density, kg/m <sup>3</sup>	Теплопро- водность, Bт/м·K <i>Heat</i> conductivity, W/m·K	Теплоем- кость, Дж • кг/К <i>Heat</i> <i>capacity,</i> <i>J</i> • kg/K	
GaN AlGaN	Гетероструктура Heterostructure	6070 5184	130 40	490 604	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Подложка Substrate	3965	35	730	
SiC	Подложка Substrate	3216	490	690	

Свойства материалов СВЧ МИС Properties of the materials of the microwave MIC

канала. Контакт между слоями считаем идеальным. СВЧ МИС задана как объект, генерирующий теплоту значением 1 Вт, исходя из измерительных данных экспериментальных образцов. Исследование распределения температуры прибора проводили с помощью компьютерного моделирования.

В расчетах применяли уравнение теплопроводности:

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

где  $q_v$  — мощность внутреннего источника теплоты;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $\rho$  — плотность вещества;  $c_p$  — теплоемкость вещества при постоянном давлении; T — температура в процессе работы.

Дифференциальное уравнение (1) решается методом конечных элементов [13] при граничных условиях третьего рода:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{s} = -\frac{\alpha}{\lambda} (T - T_{c}), \qquad (2)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $T_c$  — температура окружающего пространства; n — модуль вектора нормали.

В расчетах были приняты следующие условия: теплоотвод идеальный (принудительно задана температура для дна подложки, равная 27 °С); температура окружающей среды 27 °С; начальная температура объекта 27 °С. Свойства материалов, взятые из литературных источников и послужившие в качестве исходных данных для компьютерного моделирования, представлены в таблице.

Путем компьютерного моделирования были получены распределения температуры кристалла в виде изоповерхностей для различных материалов и толщин подложек (рис. 1 и 2). Цветовая температурная шкала дает представление о характере распределения теплоты в режиме работы СВЧ МИС. Для наглядности распределение температуры в зависимости от толщины подложки СВЧ МИС для двух типов материалов подложки сведено в график (рис. 3).

Представленные изоповерхности и график наглядно демонстрируют преимущества карбида кремния перед сапфиром в части теплоотведения.

# Зависимость прогиба приборной пластины от материала и толщины подложки

Роль упругих напряжений в выращенном на подложке слое GaN, неизбежно возникающих вследствие рассогласования кристаллических решеток GaN и подложки, при уменьшении толщины подложки возрастает. Данный аспект выражается в увеличении радиуса кривизны приборной



Рис. 1. Трехмерное представление распределения температуры кристалла в виде изоповерхностей для подложки сапфира толщиной 500 мкм (a) и 50 мкм (b) при тепловыделении СВЧ МИС 1 Вт

Fig. 1. Three-dimensional presentation of the distribution of temperature of a crystal in the form of isosurfaces for a substrate of sapphire with thickness of 500  $\mu$ m (a) and 50  $\mu$ m (b) at the thermal emission of the microwave MIC of 1 W



Рис. 2. Трехмерное представление распределения температуры кристалла в виде изоповерхностей для подложки карбида кремния толщиной 500 мкм (a) и 50 мкм (b) при тепловыделении СВЧ МИС 1 Вт

Fig. 2. Three-dimensional presentation of the distribution of temperature of a crystal in the form of isosurfaces for a substrate of silicon carbide with thickness of 500  $\mu$ m (a) and 50  $\mu$ m (b) at the thermal emission of the microwave MIC of 1 W

пластины, который можно наблюдать после склеивания пластины с диска-носителя после операций шлифования и полирования. Это обстоятельство увеличивает риск повреждения приборной пластины при дальнейшем обращении с ней.

Зависимость радиуса кривизны подложки толщиной  $h_s$ , на которую нанесена упруго напряженная пленка толщиной  $h_f$ , описывается формулой Стоуни, которая справедлива при условии, что подложка гораздо толще нанесенной на нее пленки ( $h_f \ll h_s$ ) [14]:

$$\sigma_f h_f = \left(\frac{E_s}{1 - v_s}\right) \cdot \frac{h_s^2}{6R},\tag{3}$$

где R — радиус кривизны подложки;  $E_s$  — модуль упругости (или иначе модуль Юнга) материала подложки; v — коэффициент Пуассона материала подложки;  $\sigma_f$  — упругое напряжение пленки. Индекс "s" обозначает подложку (substrate), а индекс "f" — пленку (film).



Рис. 3. Распределение температуры кристалла СВЧ МИС от толщины подложки для сапфира и карбида кремния при тепловыделении 1 Вт: 1 — сапфир; 2 — SiC

Fig. 3. Distribution of temperature of the crystal of the microwave MIC depending on the thickness of a substrate for sapphire and silicon carbide at the thermal emission of 1 W: 1 - sapphire; 2 - SiC



Рис. 4. Зависимость прогиба приборной пластины от толщины подложки: 1 — сапфир; 2 — SiC

Fig. 4. Dependence of deflection of an instrument plate on thickness of a substrate: 1 - sapphire; 2 - SiC



Рис. 5. Прогиб приборной пластины карбида кремния: толщина пластины 130 мкм, прогиб составляет 108 мкм

Fig. 5. Deflection of an instrument plate of the silicon carbide. Thickness of the plate - 130  $\mu m,$  deflection - 108  $\mu m$ 

Для определения значения подложки Δz (разницы между максимальной и минимальной высотой пластины) используем следующее выражение [15]:

$$\Delta z = \frac{d^2}{8R},\tag{4}$$

где d — диаметр подложки. В расчетах были использованы значения из литературных источников [16—18]:  $E_{6H-SiC} = 503 \ \Gamma\Pi a$ ;  $v_{6H-SiC} = 0,18$ ;  $E_{Al_2O_3} = 466 \ \Gamma\Pi a$ ;  $v_{Al_2O_3} = 0,28$ ;  $h_f = 3 \ \text{мкм}$ ;  $d = 5 \ \text{см}$ ;  $\sigma_f$  (подложка 6H-SiC) = 310 MПа;  $\sigma_f$ (подложка  $Al_2O_3$ ) = 760 МПа.

На рис. 4 представлен полученный график зависимости прогиба подложки  $\Delta z$  от ее толщины  $h_s$ .

Рассчитанные зависимости прогиба приборной пластины от остаточной толщины подложки согласуются с экспериментальными данными. На рис. 5 представлен измеренный с помощью профилометра прогиб двухдюймовой приборной пластины карбида кремния на длине 44 мм при толщине подложки 130 мкм.

# Оптимизация толщины подложки приборных пластин сапфира и карбида кремния

Оптимальную толщину подложки приборных пластин сапфира и карбида кремния определяли исходя из совместного сравнения и анализа графика распределения температуры кристалла СВЧ МИС от толщины подложки для сапфира и карбида кремния при тепловыделении СВЧ МИС 1 Вт, а также графика зависимости прогиба приборных пластин от толщины подложки.

Экспериментально установлена рабочая температура СВЧ МИС, которая составляет 85 °С. В целях предупреждения отказа приборов вследствие неконтролируемого повышения температуры, для сравнительного анализа при определении оптимальной толщины подложки использовали сниженное на 10 % значение температуры.

По различным оценкам передовые зарубежные компании работают с пластинами толщиной 100...120 мкм [19]. Данная толщина обусловлена тем, что кажущаяся простота задачи по утонению



Рис. 6. Сравнение и анализ графика распределения температуры кристалла СВЧ МИС от толщины подложки для сапфира и карбида кремния при тепловыделении 1 Вт, а также графика зависимости прогиба приборных пластин от толщины подложки: 1 -сапфир; 2 -SiC

Fig. 6. Comparison of the diagram of distribution of temperature of the microwave MIC crystal depending on thickness of a substrate for the sapphire and silicon carbide at a thermal emission of 1 W, and also a diagram of dependence of deflection of the instrument plates on the thickness of a substrate: 1 - sapphire; 2 - SiC

пластин является обманчивой. Пластина, поступающая на стадию утонения обратной стороны, проходит многочисленные этапы формирования легированных слоев в объеме пластины, а также формирование разнообразных диэлектрических и металлических слоев на ее поверхности. В результате в пластине возникают значительные внутренние напряжения. Эти напряжения являются основной причиной деформации, риска повреждений и боя пластин. Кроме того, экспериментально установлено, что толщина пластины 100 мкм и менее затрудняет работу оператора с ней и увеличивает риск механического повреждения в последующих процессах отклеивания, измерения и резки на кристаллы СВЧ МИС.

Таким образом, полученный путем сравнения графиков распределения температуры кристалла и зависимости прогиба приборных пластин от толщины подложки расчетный оптимальный диапазон толщины подложки приборных пластин сапфира и карбида кремния с изготовленными на них СВЧ МИС тепловыделением 1 Вт составил 110...150 мкм (рис. 6).

### Заключение

Путем исследования распределения температуры кристалла СВЧ МИС с помощью компьютерного моделирования, а также сравнения полученных данных с рассчитанными зависимостями значений прогиба приборных пластин сапфира и карбида кремния от толщины подложки, обусловленных упругими напряжениями в выращенном на подложке слое GaN, которые неизбежно возникают вследствие рассогласования кристаллических решеток GaN и материала подложки и играющих возрастающую роль при уменьшении толщины подложки, выявлена и определена оптимальная толщина подложки приборных пластин сапфира и карбида кремния, которая составляет 110...150 мкм.

Очевидно, что указанный выше диапазон оптимальной толщины подложки приборных пластин сапфира и карбида кремния справедлив для определенных значений рабочей температуры СВЧ МИС, а также диаметра пластины и толщины выращенного слоя GaN. При изменении указанных величин диапазон оптимальной толщины подложки приборных пластин закономерно может изменяться, что следует принимать во внимание.

Указанный диапазон можно рекомендовать принять к сведению при проектировании изделий СВЧ электроники в части расчетов рабочих характеристик приборов применительно к конечной толщине подложки, а следовательно, и к конечной толщине кристаллов МИС, что в свете продолжающейся миниатюризации электронных компонентов при неизменном сохранении их качества и надежности, представляется актуальным. Кроме того, снижение толщины приборной пластины позволяет сократить время операции резки пластины на кристаллы, а также понизить износ режущего инструмента, что в случае резки таких твердых материалов, как сапфир и карбид кремния, отражается на экономичности операции, а следовательно, и на конечной стоимости готового СВЧ прибора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0011, уникальный идентификатор проекта RFMEF160714X0011).

### Список литературы

1. Федоров Ю. В., Михайлович С. В. Перспективы замены арсенидных МИС на нитридные // Нано- и микросистемная техника. 2016. Том 18, № 4. С. 217—226.

2. Федоров Ю., Мальцев П., Матвеенко О., Гнатюк Д., Крапухин Д., Путинцев Б., Павлов А., Зуев А. МИС усилителей со встроенными антеннами СВЧ диапазона на наногетероструктурах // Наноиндустрия. 2015. № 3. С. 44—51.

3. Балакирев А., Туркин А. Развитие технологии нитрида галлия и перспективы его применения в СВЧ электронике // Современная электроника. 2015. № 4. С. 28—32.

4. Joshin K., Kikkawa T., Masuda S., Watanabe K. Outlook for GaN HEMT Technology // Fujitsu Sci. Tech. J. 2014. Vol. 50, N. 1. P. 138–143.

5. Burns C., LeFevre M., Mellor M., Runton D. Advancements in GaN technology // Proc. of European Microwave Conf. Amsterdam, 2012.

6. **Persson E.** Höherer Wirkungsgrad dank Galliumnitrid // Design & Electronic. 2015. N. 11. P. 25–27.

7. **Matheson R.** Making the new silicon: Gallium nitride electronics could drastically cut energy usage // Massachusetts Institute of Technology, MIT news office. 2015. URL: http://news. mit.edu/2015/gallium-nitride-electronics-silicon-cut-energy-0729.

8. Pengelly R. S., Wood S. M., Milligan J. W., Sheppard S. T., Pribble W. L. A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs" // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2012. Vol. 60, N. 6.

9. **Polyakov A. Y., Lee I. H.** Deep traps in GaN-based structures as affecting the performance of GaN devices // Materials Science and Engineering R. 2015. Vol. 94. P. 1–56.

10. Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Тепломассообмен: учебник для вузов. М.: Изд. дом МЭИ, 2011. 298 с.

11. Федоров Ю. В., Майтама М. В. Топология ИМС "Интегральный малошумящий усилитель для диапазона частот 8—12 ГГц". Свидетельство о государственной регистрации № 2016630103 от 19.08.2016 г.

12. Федоров Ю. В., Майтама М. В. Топология ИМС "Интегральный усилитель мощности для диапазона частот 8—12 ГГц". Свидетельство о государственной регистрации № 2016630104 от 19.08.2016 г.

13. Мельников А. А. Расчет электромагнитных и температурных полей методом конечных элементов: учеб. пособие. М.: МИРЭА, 2001. 35 с.

14. Janssen G. C. A. M., Abdalla M. M., van Keulen F., Pujada B. R., van Venrooy B. Celebrating the 100th anniversary of the Stoney equation for film stress: Developments from polycrystalline steel strips to single crystal silicon wafers // Thin Solid Films. 2009. Vol. 517, N. 6. P. 1858–1867. 15. Громовик А. И. Расчет круглых пластин: методические указания. Омск: Изд-во СибАДИ, 2011. 33 с.

16. Jang Y., Kim W. R., Jang D.-H., Shim J.-I., Shin D.-S. Analysis of the stress distribution in the nonuniformly bent GaN thin film grown on a sapphire substrate // Journal of Applied Physics. 2010. Vol. 107, N. 11. P. 113537.

17. Thokala R., Chaudhuri J. Calculated elastic constants of wide band gap semiconductor thin films with a hexagonal crystal

structure for stress problems // Thin Sold Films. 1995. Vol. 266, N. 2. P. 189–191.

18. Kukushkin S. A., Osipov A. V., Bessolov V. N., Medvedev B. K., Nevolin V. K., Tcarik K. A. Substrates for Epitaxy of Gallium Nitride: New Materials and Techniques // Reviews on Advanced Materials Science. 2008. Vol. 17, N. 1/2. P. 1–32.

19. Бондарь Д. Ультратонкие пластины как тенденция развития полупроводниковых технологий // Компоненты и технологии. 2012. № 11. С. 116—122.

**A. A. Trofimov**, Junior Researcher, aa-trofimov@yandex.ru, Institute of Microwave Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences, 117105, Moscow

# **Optimization of the Thickness of the Substrates for the Instrument Plates of Sapphire and Silicon Carbide**

Corresponding author:

**Trofimov Aleksandr A.**, Junior Researcher, Institute of Microwave Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117105, Russian Federation, e-mail: aa-trofimov@yandex.ru

Received on November 09, 2016 Accepted on November 18, 2016

Works were done for optimization of the thickness of the substrates for the instrument plates of sapphire and silicon carbide with the microwave MIC made on them. The optimal range of the thicknesses of the substrates for the instrument plates of sapphire and silicon carbide was established taking into account the heat generation of the microwave MIC and deformation of the plates due to the internal stresses, caused by the mismatch of the crystal lattices of the substrates and the GaN layer grown on them.

Keywords: instrument plates of sapphire and silicon carbide, microwave MIC, thickness of a substrate for the instrument plates

### For citation:

**Trofimov A. A.** Optimization of the Thickness of the Substrates for the Instrument Plates of Sapphire and Silicon Carbide, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 219–226.

DOI: 10.17587/nmst.19.219-226

### Introduction

The advantages of the microwave technologies and devices on the basis of the plates of sapphire and silicon carbide are recognized by many authors [1-8]. The microwave monolithic integrated circuits on the basis of gallium nitride can work in a wide temperature range and in harsh radiation conditions, which is important for the space industry, nuclear power engineering and military applications. The substrates for manufacture of the radiation-resistant microwave MIC on nitride heterostructures are sapphire and silicon carbide. The microwave devices on the basis of GaN heterostructures have high specific power, which demands an efficient heatsink. This can be promoted by reduction of the thickness of the substrate, carried out by means of grinding and polishing. However the properties of the nitrides essentially differ from those of the other semiconductors. Thus, the density of the dislocations (linear violations of the structure connected with the difference in the parameters of the lattice of the substrate material and the GaN layer and the coefficients of thermal expansion, and also the presence of the mechanical stresses) in nitrides is by five orders higher, than in the gallium arsenide [9]. The elastic stresses in the GaN layer, inevitably arising due to a mismatch of the crystal

lattices of GaN and a substrate, during reduction of the thickness of a substrate increase in the inverse proportion to its thickness, which hinders the work with a plate at different stages and can cause a destruction of the instrument plate.

Thus, the problem is in optimization of the thickness of the substrates of the instrument plates of sapphire and silicon carbide, taking into account the thermal emission of the devices and deformation of the plates owing to the internal stresses.

# Distribution of temperature of the microwave MIC depending on the material and thickness of a substrate

In heat transfer terms operation of the microwave MIC can be described as generation of heat by an internal thermal source, heat transfer in the environment and dissipation of heat [10]. Microwave MIC is a low-noise amplifier organized by a two-cascade circuit [11, 12]. In the thermal model of the transistor the heat source is the subgate part the channel. The contact between the layers is considered as ideal. Microwave MIC is set as an object generating heat of 1 W, proceeding from the measuring data of the samples. Research of the distribution of temperature of the device was done by a computer simulation.

In calculations the following heat conductivity equation was applied:

$$c_{p}\rho\frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^{2}T}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}T}{\partial y^{2}} + \frac{\partial^{2}T}{\partial z^{2}}\right) + q_{v}, \qquad (1)$$

where  $q_v$  — power of the internal thermal source;  $\lambda$  — heat conductivity coefficient;  $\rho$  — density of the substance;  $c_p$  — its heat capacity under constant pressure; T — working temperature.

The differential equation (1) is solved by the method of the final elements [13] under the boundary conditions of the third kind:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{s} = -\frac{\alpha}{\lambda} \left(T - T_{c}\right), \qquad (2)$$

where  $\alpha$  — heat-transfer coefficient;  $T_c$  — temperature of the surrounding environment; n — normal vector module.

The calculations were based on the following conditions: an ideal heatsink (the forcefully set temperature of the bottom of the substrate 27 °C); the temperature of the surrounding environment 27 °C; the initial temperature of the object 27 °C. The properties of the materials, taken from literature and used as the initial data for the simulation, are presented in table.

By computer simulation we obtained the distributions of temperature of a crystal in the form of isosurfaces for various materials and thicknesses of the substrates (fig. 1 and 2). The color temperature scale gives an idea about the character of distribution of heat in the operating mode of the microwave MIC.

The distribution of temperature depending on the thickness of the substrate of the microwave MIC for the two types of materials of a substrate is presented in fig. 3.

The isosurfaces and the diagram present visually the heatsink advantages of the silicon carbide compared with the sapphire.

### Dependence of the deflection of an instrument plate on the material and thickness of a substrate

If the thickness of the substrate is reduced, the role of the elastic stresses in the GaN layer grown on a substrate, which appear because of the mismatch of the crystal lattices of GaN and the substrate, increases. The given aspect is expressed in an increase of the curvature radius of an instrument plate, which can be observed after pasting of a plate from a disk-carrier after grinding and polishing. This increases the risk of damage of the instrument plate during its handling.

Dependence of the curvature radius of a substrate with thickness  $h_s$  on which an elastic-intense film with thickness  $h_f$ , is deposited, is described by Stoney formula, correct on the condition that a substrate is much thicker than the film deposited on it  $(h_f \ll h_s)$  [14]:

$$\sigma_f h_f = \left(\frac{E_s}{1 - v_s}\right) \cdot \frac{h_s^2}{6R},\tag{3}$$

where R — curvature radius of a substrate;  $E_s$  — modulus of elasticity (or Young modulus) of the substrate material; v — Poisson's ratio of the substrate material;  $\sigma_f$  — elastic stress of a film. ("*s*" stands for substrate, and "*f*" stands for film).

For substrate deflection  $\Delta z$  (difference between the maximal and minimal height of a plate) we use the following expression [15]:

$$\Delta z = \frac{d^2}{8R},\tag{4}$$

where d – diameter of a substrate. In calculations we used the values from literature [16–18].

The values used for simulation of a substrate deflection:  $E_{6\text{H-SiC}} = 503 \text{ GPa}$ ;  $v_{6\text{H-SiC}} = 0.18$ ;  $E_{Al_2O_3} = 466 \text{ GPa}$ ;  $v_{Al_2O_3} = 0.28$ ;  $h_f = 3 \text{ }\mu\text{m}$ ; d = 5 cm;  $\sigma_f$  (substrate 6H-SiC) = 310 MPa;  $\sigma_f$  (substrate Al\_2O\_3) = = 760 \text{ MPa}.

Fig. 4 presents the diagram of dependence of the magnitude of deflection of a substrate  $\Delta z$  on its thickness  $h_{s}$ .

The calculated dependences of the magnitude of deflection of an instrument plate on the residual thickness of a substrate agree with the experiment. Fig. 5 presents the magnitude of deflection of a two-inch instrument plate of silicon carbide with the length of 44 mm and thickness of a substrate of 130  $\mu$ m measured with the help of a profilometer.

### Optimization of the thickness of the substrates of the instrument plates of sapphire and silicon carbide

The optimal thickness of a substrate of the instrument plates of sapphire and silicon carbide was determined proceeding from comparison of the diagram of distribution of temperature of the crystal of the microwave MIC on the thickness of a substrate for sapphire and silicon carbide during the thermal emission of the microwave MIC of 1 W, and also the diagram of dependence of the magnitude of deflection of the instrument plates on the thickness of a substrate.

The working temperature of the microwave MIC was experimentally established as equal to 85 °C. In order to prevent failures of the devices due to an uncontrollable rise of temperature, for determination of the optimal thickness of a substrate the lowered by 10 % value of the temperature was used.

According to various estimates, the thickness of the plates, the foreign companies operate with, is equal to  $100...120 \ \mu m$  [19]. The thickness is determined by the fact that the seeming simplicity of the problem of thinning is deceptive. The plate coming for thinning of the reverse side passes numerous stages of formation of the alloyed layers in the plate volume, and also formation of various dielectric and metal layers on its surface. As

a result the plate is characterized by considerable inner stresses. Those stresses are the main cause of deformations, risks of damage and failures. Besides, it was experimentally established, that the thickness of a plate of 100 micrometers and less complicates the work of an operator and increases the risk of a mechanical damage in the processes of unsticking, measurements and cutting of the crystals of the microwave MIC.

Thus, the calculated optimal range of the thickness of the substrates of the instrument plates of sapphire and silicon carbide with the microwave MIC made on them and thermal emission of 1 W received by comparison of the diagrams of distribution of temperature of a crystal and dependence on deflection of the instrument plates on the thickness of a substrate, was 110...150  $\mu$ m (fig. 6).

### Conclusion

Research of the distribution of temperature of the microwave MIC crystal by means of computer simulation and also by comparison of the data with the calculated dependences of deflection of the instrument plates of sapphire and silicon carbide on the thickness of a substrate, determined by the elastic stresses in the layer of GaN grown on the substrate, arising because of a mismatch of the crystal lattices of GaN and the material of a substrate and playing an increasing role in reduction of the thickness of a substrate for the instrument plates of sapphire and silicon carbide, which was 110–150  $\mu$ m.

It is obvious, that the range of the optimal thickness of a substrate for the instrument plates of sapphire and silicon carbide is fair for certain values of the working temperature of the microwave MIC, and also the diameter of a plate and thickness of the grown up GaN layer. If the specified values are changed, naturally, the range of the optimal thickness of a substrate for the instrument plates can also change, which should be taken into account.

The specified range can be recommend for taking into consideration in designing of the microwave electronic products regarding the calculations of the performance data of the devices with reference to the thickness of a substrate, and, hence, and to the final thickness of MIC crystals, which is topical in the light of miniaturization of the electronic components alongside with the invariable preservation of their quality and reliability. Besides, a decrease of the thickness of an instrument plate allows us to reduce the time necessary for cutting of a plate into crystals, and also to lower the tear and wear of the cutting tools, which in case of such hard materials as sapphire and silicon carbide, tells on the profitability, and, hence, and on final cost of a microwave device. The work was done with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant agreement  $N_{\rm P}$  14.607.21.0011, the unique identifier of the project — RFMEF160714X0011).

### References

1. Fedorov Yu. V., Mikhailovich S. V. Perspektivy zameny arsenidnych MIS na nitridnye, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 217–226 (in Russian).

2. Fedorov Yu., Maltsev P., Matveenko O., Gnatyuk D., Krapuchin D., Putincev B., Pavlov A., Zuev A. MIS usiliteley so vstroennymi antennami SVCH diapazona na nanogeterostrukturach, *Nanoindustriya*, 2015, no. 3, pp. 44–51 (in Russian).

3. **Balakirev A., Turkin A.** Razvitie technologii nitrida galliya i perspektivy ego primeneniya v SVCH elektronike, *Sovremennaya elektronika*, 2015, no. 4, pp. 28–32 (in Russian).

4. Joshin K., Kikkawa T., Masuda S., Watanabe K. Outlook for GaN HEMT Technology, *Fujitsu Sci. Tech. J.*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 138–143.

5. Burns C., LeFevre M., Mellor M., Runton D. Advancements in GaN technology, *Proc. of European Microwave Conf. Amsterdam*, 2012.

6. **Persson E.** Höherer Wirkungsgrad dank Galliumnitrid, *Design & Electronic*, 2015, no. 11, pp. 25–27.

7. Matheson R. Making the new silicon: Gallium nitride electronics could drastically cut energy usage, Massachusetts Institute of Technology, 2015.

8. Pengelly R. S., Wood S. M., Milligan J. W., Sheppard S. T., Pribble W. L. A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, vol. 60, no. 6.

9. Polyakov A. Y., In-Hwan Lee. Deep traps in GaN-based structures as affecting the performance of GaN devices, *Materials Science and Engineering R*, 2015, vol. 94, pp. 1–56.

10. Tsvetkov F. F., Grigoriev B. A. Teplomassoobmen, Uchebnik dlyz vuzov, Moskow, MEI, 2011, 298 p. (in Russian).

11. Fedorov Yu. V., Maytama M. V. Topologiya IMS "Integralnyi maloshumyashiy usilitel dlya diapazona chastot 8–12 GHz", Svidetelstvo o gosudarstvennoi registracii № 2016630103, 19.08.2016 (in Russian).

12. Fedorov Yu. V., Maytama M. V. Topologiya IMS "Integralnyi usilitel moshnosti dlya diapazona chastot 8–12 GHz", Svidetelstvo o gosudarstvennoi registracii № 2016630104, 19.08.2016 (in Russian).

13. **Melnikov A. A.** *Raschet elektromagnitnyh i temperaturnyh poley metodom konechnyh elementov, ucheb. posob.,* M.: MIREA, 2001, 35 p.

14. Janssen G. C. A. M., Abdalla M. M., van Keulen F., Pujada B. R., van Venrooy B. Celebrating the 100th anniversary of the Stoney equation for film stress: Developments from polycrystalline steel strips to single crystal silicon wafers, *Thin Solid Films*, 2009, vol. 517, no. 6, pp. 1858–1867.

15. Gromovik A. I. Raschet kruglyh plastin, Metod. ukaz., Omsk, SibADI, 2011, 33 p. (in Russian).

16. Jang Y., Kim W. R., Jang D.-H., Shim J.-I., Shin D.-S. Analysis of the stress distribution in the nonuniformly bent GaN thin film grown on a sapphire substrate, *Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 107, no. 11, p. 113537.

17. **Thokala R., Chaudhuri J.** Calculated elastic constants of wide band gap semiconductor thin films with a hexagonal crystal structure for stress problems, *Thin Sold Films*, 1995, vol. 266, no. 2, pp. 189–191.

18. Kukushkin S. A., Osipov A. V., Bessolov V. N., Medvedev B. K., Nevolin V. K., Tcarik K. A. Substrates for Epitaxy of Gallium Nitride: New Materials and Techniques, *Reviews on Advanced Materials Science*, 2008, vol. 17, no. 1/2, pp. 1–32.

19. **Bondar D.** Ultratonkie plastiny kak tendenciya razvitiya poluprovodnikovyh tehnologii, *Komponenty i tehnologii*, 2012, no. 11, pp. 116–122 (in Russian).

# Элементы MHCT *M*icro-AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

### УДК 621.315

DOI: 10.17587/nmst.19.227-238

**С. М. Афонин**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доц., e-mail: eduems@mail.ru, НИУ Московский институт электронной техники, г. Москва

## СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТОУПРУГИХ АКТЮАТОРОВ ДЛЯ НАНО- И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

### Поступила в редакцию 29.12.2016

Получены структурно-параметрические модели, параметрические структурные схемы и передаточные функции электромагнитоупругих актюаторов для нано- и микросистемной техники, на основе решения волнового уравнения построены обобщенная структурно-параметрическая модель электромагнитоупругого актюатора и обобщенная параметрическая структурная схема. Применение пьезоактюаторов нано- и микроперемещений перспективно в нанотехнологии, нанобиологии, фотонике, энергетике, микроэлектронике и астрономии для прецизионного совмещения, компенсации температурных и гравитационных деформаций. Исследованы статические и динамические характеристики пьезоактюаторов для нано- и микросистемной техники.

**Ключевые слова:** структурно-параметрическая модель, параметрическая структурная схема, электромагнитоупругий актюатор, пьезоактюатор, деформация, нано- и микроперемещения, передаточная функция

### Введение

Электромагнитоупругие актюаторы, работающие на основе электромагнитоупругости (пьезоэлектрического, пьезомагнитного, электрострикционного, магнитострикционного эффектов), применяются в оборудовании нано- и микросистемной техники, нанотехнологии, нанобиологии, энергетики, микроэлектроники и адаптивной оптики для прецизионного совмещения, компенсации температурных и гравитационных деформаций, а также атмосферной турбулентности путем коррекции волнового фронта. Пьезоактюатор — пьезомеханическое устройство, предназначенное для приведения в действие механизмов, систем или управления ими на основе пьезоэлектрического эффекта, преобразует электрические сигналы в механическое перемещение и силу. Пьезоактюаторы имеют высокие значения пьезомодулей и жесткостей, поэтому широко применяются для нано- и микроперемещений. Пьезоактюаторы работают на основе обратного пьезоэффекта, в котором результат перемещения достигается после приложения электрического напряжения за счет деформации пьезоактюатора в диапазоне от единиц нанометров до единиц микрометров с погрешностью в пределах десятых долей нанометров [1-9].

Для вывода передаточных функций электромагнитоупругого актюатора для нано- и микросистемной техники используем структурно-параметрическую модель актюатора в отличие от применения электрических эквивалентных схем пьезопреобразоватей [10—12], предназначеных для расчета пьезоизлучателей и пьезоприемников. На основе решения волнового уравнения с учетом уравнения электромагнитоупругости и граничных условий на двух торцах актюатора получаем структурно-параметрическую модель электромагнитоупругого актюатора в виде системы уравнений и его передаточные функции.

Пьезоактюаторы обеспечивают высокие усилия и скорости работы, их используют для совмещения и сканирования в наноманипуляторах для сканирующих туннельных микроскопов (СТМ), сканирующих силовых микроскопов (ССМ), атомно-силовых микроскопов (АСМ). Наноманипуляторы с пьезоактюаторами применяют в наноробототехнических системах нано- и микроперемещений. Пьезоактюаторы для нано- и микросистемной техники используют в линейных нано- и микроприводах и микронасосах. В фотонике пьезоактюаторы применяют для нано- и микроперемещений зеркал лазеров при оптических методах передачи информации и энергии, для юстировки зеркал лазерных кольцевых гироскопов. Пьезоактюаторы используют в адаптивной оптике больших телескопов, например, Европейского чрезвычайно большого телескопа (European Extremely Large Telescope, E-ELT) и Большого синоптического обзорного телескопа (Large Synoptic Survey Telescope, LSST). Пьезоактюаторы применяют для коррекции деформации и вибраций корпусов и лопастей вертолетов и самолетов в аэрокосмической технике, для юстировки космических телескопов, для микропривода инструментов в микрохирургии и биотехнологии. Пьезоактюаторы изготавливают из пьезоэлектрической керамики на основе цирконата и титаната свинца марок ЦТС или РZT, например, ЦТС-19, ЦТС-21, ЦТС-23, ЦТС-26Ц, ЦТС-36, ЦТС-42, ЦТС-43, ЦТС-46, ЦТС-47, ЦТС-48, НЦТС-1, НЦТБС-1, ЦТБС-3, ЦТБС-7, ПКР-7, ПКР-7М или РZT-4, РZT-5Н [1—22].

### Структурно-параметрические модели актюаторов

Деформация пьезоактюатора соответствует его напряженному состоянию [7, 15]. Если в пьезоактюаторе создать механическое напряжение T, то в нем возникнет деформация S. Существует шесть компонент напряжений:  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_5$ ,  $T_6$ , из них  $T_1 - T_3$  относятся к напряжениям растяжениясжатия,  $T_4 - T_6 - \kappa$  напряжениям сдвига. Матричные уравнения состояния [12], связывающие электрические и упругие переменные для поляризованной пьезокерамики, имеют вид

$$\mathbf{D} = \mathbf{dT} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E}; \tag{1}$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d}^T \mathbf{E}.$$
 (2)

Здесь первое уравнение описывает прямой пьезоэффект, а второе — обратный пьезоэффект; **D** матрица-столбец электрической индукции по координатным осям; **S** — матрица-столбец относительных деформаций; **T** — матрица-столбец механических напряжений; **E** — матрица-столбец напряженности электрического поля по координатным осям; **d** — матрица пьезоэлектрических модулей;  $\varepsilon^{T}$  — матрица диэлектрических проницаемостей при T = const;  $\mathbf{s}^{E}$  — матрица упругих податливостей при E = const. Направление вектора поляризации P, т. е. направление, по которому проведена поляризация пьезоэффекта принимают за направление оси 3.

В общем виде уравнение электромагнитоупругости [12] актюатора имеет вид

$$S_i = s_{ij}^{E, H, \Theta} T_j + d_{mi}^{H, \Theta} E_m + d_{mi}^{E, \Theta} H_m + \alpha_i^{E, H} \Delta \Theta, (3)$$
  
где  $S_i$  — относительная деформация электромагни-  
тоупругого актюатора по оси *i*;  $s_{ij}^{E, H, \Theta}$  — упругая  
податливость при постоянных величинах  $E = \text{const},$   
 $H = \text{const}, \Theta = \text{const}; T_j$  — механическое напря-  
жение в актюаторе по оси *j*;  $d_{mi}^{H, \Theta}$  — пьезомодуль;

 $E_m$  — напряженность электрического поля в актюаторе по оси *m*;  $d_{mi}^{E,\Theta}$  — коэффициент магнитострикции;  $H_m$  — напряженность магнитного поля в актюаторе по оси *m*;  $\alpha_i^{E,H}$  — коэффициент теплового расширения;  $\Delta\Theta$  — изменение температуры актюатора; *i*, *j* = 1, 2, ..., 6; *m* = 1, 2, 3.

Пьезоактюатор на рис. 1 при продольном пьезоэффекте представляет собой пьезопластину толщиной  $\delta$  с электродами на торцах, перпендикулярных оси 3. Площадь актюатора равна  $S_0$ . Для составления структурно-параметрической модели пьезоактюатора решим совместно волновое уравнение, уравнение обратного пьезоэффекта и уравнения сил на его гранях. При расчете пьезоактюатора используется волновое уравнение [12—18], описывающее распространение волны в длинной линии с затуханием без искажений:

$$\frac{1}{(c^E)^2} \frac{\partial^2 \xi(x,t)}{\partial t^2} + \frac{2\alpha}{c^E} \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial t} + \alpha^2 \xi(x,t) = \frac{\partial^2 \xi(x,t)}{\partial x^2}, (4)$$

где  $c^E$  — скорость распространения упругой волны при E = const;  $\xi$  — смещение сечения пьезоактюатора;  $\alpha$  — коэффициент затухания колебаний изза рассеивания энергии на тепловые потери при распространении волны в пьезоактюаторе. С помощью преобразования Лапласа [13] исходная задача для уравнения с частными производными гиперболического типа — волнового уравнения (4) сводится к более простой задаче для линейного обыкновенного дифференциального уравнения с параметром *p*, где *p* — параметр преобразования. Применив к волновому уравнению (4) преобразование Лапласа [13] и считая начальные условия нулевыми, получаем линейное обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 \Xi(x,p)}{dx^2} - \left[\frac{1}{(c^E)^2}p^2 + \frac{2\alpha}{c^E}p + \alpha^2\right] \Xi(x,p) = 0, \quad (5)$$



**Рис. 1.** Пьезоактюатор при продольном пьезоэффекте:  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  — перемещение двух торцов пьезоактюатора;  $M_1$ ,  $M_2$  — массы нагрузки на двух торцах;  $F_1$ ,  $F_2$  — силы нагрузки на двух торцах Fig. 1. Piezoactuator at the longitudinal piezoeffect:  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  — displacement of the end faces of the piezoactuator;  $M_1$ ,  $M_2$  — masses of loads at the end faces;  $F_1$ ,  $F_2$  — forces of loads at the end faces



Рис. 2. Параметрическая структурная схема пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и управлении по напряжению

Fig. 2. Parametrical block diagram of the piezoactuator at the longitudinal piezoeffect and voltage control

решением которого будет функция

$$\Xi(x, p) = C \mathbf{e}^{-x\gamma} + B \mathbf{e}^{x\gamma}, \qquad (6)$$

где  $\Xi(x, p)$  — преобразование Лапласа смещения сечения пьезоактюатора;  $\gamma = p/c^E + \alpha$  — коэффициент распространения.

Определим постоянные С и В в виде

$$C = (\Xi_1 \mathbf{e}^{\delta \gamma} - \Xi_2) / [2 \mathrm{sh}(\delta \gamma)];$$
  
$$B = (\Xi_1 \mathbf{e}^{-\delta \gamma} - \Xi_2) / [2 \mathrm{sh}(\delta \gamma)], \qquad (7)$$

поэтому получаем решение уравнения (5) в виде

$$\Xi(x, p) = \{\Xi_1(p) \operatorname{sh}[(\delta - x)\gamma)] + \\ + \Xi_2(p) \operatorname{sh}[(x\gamma)\}/\operatorname{sh}(\delta\gamma).$$
(8)

Уравнения для преобразований Лапласа сил на двух торцах пьезоактюатора

$$T_{3}(0, p)S_{0} = F_{1}(p) + M_{1}p^{2}\Xi_{1}(p) \text{ при } x = 0;$$
  
$$T_{3}(\delta, p)S_{0} = -F_{2}(p) + M_{2}p^{2}\Xi_{1}(p) \text{ при } x = \delta, \quad (9)$$

где соответствующие преобразования Лапласа для выражений механических напряжений  $T_3(0, p)$  и  $T_3(\delta, p)$  пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте определяются из уравнения обратного пьезоэффекта:

$$T_{3}(0, p) = \frac{1}{s_{33}^{E}} \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \Big|_{x=0} - \frac{d_{33}}{s_{33}^{E}} E_{3}(p);$$
  
$$T_{3}(\delta, p) = \frac{1}{s_{33}^{E}} \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \Big|_{x=\delta} - \frac{d_{33}}{s_{33}^{E}} E_{3}(p), \quad (10)$$

где  $d_{33}$  — продольный пьезомодуль;  $s_{33}^E$  — упругая податливость по оси 3 при E = const.

С учетом решения линейного обыкновенного дифференциального уравнения (5) получаем систему уравнений для структурно-параметрической модели пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и управлении по напряжению

$$\Xi_{1}(p) = [1/M_{1}p^{2})]\{-F_{1}(p) + (1/\chi_{33}^{E})[d_{33}E_{3}(p) - [\gamma/\text{sh}(\delta\gamma)][\text{ch}(\delta\gamma)\Xi_{1}(p) - \Xi_{2}(p)]]\};$$
  
$$\Xi_{2}(p) = [1/M_{2}p^{2})]\{-F_{2}(p) + (1/\chi_{33}^{E})[d_{33}E_{3}(p) - [\gamma/\text{sh}(\delta\gamma)][\text{ch}(\delta\gamma)\Xi_{2}(p) - \Xi_{1}(p)]]\}, (11)$$

где  $\chi_{33}^E = s_{33}^E / S_0$ . Параметрическая структурная схема пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте приведена на рис. 2.

Рассмотрим пьезоактюатор при сдвиговом пьезоэффекте (2) (рис. 3).

Соответственно для пьезоактюатора при сдвиговом пьезоэффекте находим коэффициенты *C* и *B*:

$$C = (\Xi_1 \mathbf{e}^{b\gamma} - \Xi_2) / [2\mathrm{sh}(b\gamma)],$$
  
$$B = (\Xi_1 \mathbf{e}^{-b\gamma} - \Xi_2) / [2\mathrm{sh}(b\gamma)], \qquad (12)$$

решение уравнения (5) в виде

 $\Xi(x, p) = \{\Xi_1(p)\operatorname{sh}[(b - x)\gamma)] + \Xi_2(p)\operatorname{sh}[(x\gamma)\}/\operatorname{sh}(b\gamma) (13)$ 

и систему уравнений для структурно-параметрической модели пьезоактюатора при сдвиговом пьезоэффекте и управлении по напряжению

$$\Xi_{1}(p) = [1/M_{1}p^{2}]\{-F_{1}(p) + (1/\chi_{55}^{E})[d_{15}E_{1}(p) - [\gamma/\text{sh}(b\gamma)][\text{ch}(b\gamma)\Xi_{1}(p) - \Xi_{1}(p)]]\};$$
  
$$\Xi_{2}(p) = [1/M_{2}p^{2}]\{-F_{2}(p) + (1/\chi_{55}^{E})[d_{15}E_{1}(p) - [\gamma/\text{sh}(b\gamma)][\text{ch}(b\gamma)\Xi_{2}(p) - \Xi_{1}(p)]]\},$$
(14)

где  $\chi_{55}^{E} = s_{55}^{E}/S_0$ ;  $d_{15}$  — сдвиговьй пьезомодуль;  $s_{55}^{E}$  — упругая податливость по оси 5 при E = const. Параметрическая структурная схема пьезоактюатора при сдвиговом пьезоэффекте приведена на рис. 4.

Аналогично для пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте получаем коэффициенты *С* и *В*:

$$C = (\Xi_1 \mathbf{e}^{h\gamma} - \Xi_2) / [2\mathrm{sh}(h\gamma)];$$
  
$$B = (\Xi_1 \mathbf{e}^{-h\gamma} - \Xi_2) / [2\mathrm{sh}(h\gamma)], \qquad (15)$$



Fig. 3. Piezoactuator at the shift piezoeffect

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, Том 19, № 4, 2017 -



Рис. 4. Параметрическая структурная схема пьезоактюатора при сдвиговом пьезоэффекте и управлении по напряжению

Fig. 4. Parametrical block diagram of the piezoactuator at the shift piezoeffect and voltage control

решение уравнения (5) в виде

$$\Xi(x, p) = \{\Xi_1(p) \operatorname{sh}[(h - x)\gamma)] + \\ + \Xi_2(p) \operatorname{sh}[(x\gamma)\}/\operatorname{sh}(h\gamma)$$
(16)

и систему уравнений для структурно-параметрической модели пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте и управлении по напряжению

$$\Xi_1(p) = [1/M_1 p^2) \{ -F_1(p) + (1/\chi_{11}^E) [d_{31}E_3(p) - [\gamma/\text{sh}(h\gamma)] [\text{ch}(h\gamma)\Xi_1(p) - \Xi_1(p)] \};$$

$$\Xi_{2}(p) = [1/M_{2}p^{2})]\{-F_{2}(p) + (1/\chi_{11}^{E})[d_{31}E_{3}(p) - [\gamma/\text{sh}(h\gamma)][\text{ch}(h\gamma)\Xi_{2}(p) - \Xi_{1}(p)]]\},$$
(17)

где  $\chi_{11}^E = s_{11}^E / S_0; d_{31}$  — поперечный пьезомодуль;  $s_{11}^E$  — упругая податливость по оси 1 при E = const.

Из формул (2), (3), (11), (14), (17) имеем систему уравнений для обобщенной структурно-параметрической модели электромагнитоупругого актюатора в виде

$$\Xi_{1}(p) = [1/M_{1}p^{2}]\{-F_{1}(p) + (1/\chi_{ij}^{\Psi})[\nu_{mi}\Psi_{m}(p) - [\gamma/\text{sh}(h_{j})][\text{ch}(h_{j})\Xi_{1}(p) - \Xi_{2}(p)]]\};$$
  
$$\Xi_{2}(p) = [1/M_{2}p^{2})]\{-F_{2}(p) + (1/\chi_{ij}^{\Psi})[\nu_{mi}\Psi_{m}(p) - [\gamma/\text{sh}(h_{j})][\text{ch}(h_{j})\Xi_{2}(p) - \Xi_{1}(p)]]\},$$
(18)  
$$\psi^{\Psi} = \psi^{\Psi}(S, \psi) = \begin{bmatrix} d_{33}, d_{31}, d_{15} \\ g, g, g, g \end{bmatrix}$$

$$\chi_{ij}^{\Psi} = s_{ij}^{\Psi} / S_0, \ v_{mi} = \begin{cases} d_{33}, d_{31}, d_{15} \\ g_{33}, g_{31}, g_{15} \\ d_{33}, d_{31}, d_{15} \end{cases}$$

$$\Psi_{m} = \begin{cases} E_{3}, E_{1} \\ D_{3}, D_{1}, s_{ij}^{\Psi} = \begin{cases} s_{33}^{E}, s_{11}^{E}, s_{55}^{E} \\ s_{33}^{D}, s_{11}^{D}, s_{55}^{D} \\ s_{33}^{D}, s_{11}^{D}, s_{55}^{D} \\ s_{33}^{H}, s_{11}^{H}, s_{55}^{H} \end{cases}$$
$$c^{\Psi} = \begin{cases} c^{E} \\ c^{D}, \gamma = \begin{cases} \gamma^{E} \\ \gamma^{D}, l = \begin{cases} \delta \\ h, \\ \phi \\ H \end{cases} \end{cases}$$

где параметры *E*, *D* и *H* относятся к управлению по напряжению, току для обратного пьезоэффекта и напряженности магнитного поля для магнитострикции, причем  $\chi_{ij}^{\Psi} = s_{ij}^{\Psi}/S_0$ ;  $s_{ij}^{\Psi}$  — упругая податливость при  $\Psi$  = const;  $d_{33}$ ,  $d_{31}$ ,  $d_{15}$  — пьезоэлектрические модули и коэффициенты магнитострикции;  $g_{33}$ ,  $g_{31}$ ,  $g_{15}$  — пьезоэлектрические постоянные;  $c^{\Psi}$  — скорость звука при  $\Psi$  = const; *l* — геометрический размер в направлении деформации соответственно равный  $\delta$ , *h*, *b* — толщине, высоте или ширине электромагнитоупругого актюатора;  $S_0$  — площадь соответствующего поперечного сечения актюатора.

чения актюатора. Системе уравнений (18) обобщенной структурно-параметрической модели актюатора соответствует обобщенная параметрическая структурная схема электромагнитоупругого актюатора на рис. 5.

### Передаточные функции актюатора

Из системы уравнений для обобщенной структурно-параметрической модели электромагнитоупругого актюатора нано- и микросистемной техники получаем передаточные функции актюатора как отношение преобразованных по Лапласу выражений перемещений торцов актюатора к выражению соответствующего входного параметра или соответствующей силы при нулевых начальных условиях. Решение системы уравнений (18) для перемещений двух граней электромагнитоупругого актюатора [14—17] дает

$$\Xi_{1}(p) = W_{11}(p)\Psi_{m}(p) + W_{12}(p)F_{1}(p) + W_{13}(p)F_{2}(p);$$
  

$$\Xi_{2}(p) = W_{21}(p)\Psi_{m}(p) + W_{22}(p)F_{1}(p) + W_{23}(p)F_{2}(p),$$
(19)

где обобщенные передаточные функции электромагнитоупругого актюатора

$$\begin{split} W_{11}(p) &= \Xi_1(p)/\Psi_m(p) = v_{mi} [M_2 \chi_{ij}^{\Psi} p^2 + \gamma \text{th}(h/2]/A_{ij}; \\ A_{ij} &= M_1 M_2 (\chi_{ij}^{\Psi})^2 p^4 + \{(M_1 + M_2) \chi_{ij}^{\Psi}/[c^{\Psi} \text{th}(h)]\} p^3 + \\ &+ [(M_1 + M_2) \chi_{ij}^{\Psi} \alpha/\text{th}(h) + 1/(c^{\Psi})^2] p^2 + \\ &+ 2\alpha p/c^{\Psi} + \alpha^2; \end{split}$$

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, Том 19, № 4, 2017 -



Рис. 5. Обобщенная параметрическая структурная схема электромагнитоупругого актюатора

 $Fig. \ 5. \ Generalized \ parametrical \ block \ diagram \ of \ the \ electromagneto elastic \ actuator$ 

$$W_{21}(p) = \Xi_2(p)/\Psi_m(p) = v_{mi}[M_1\chi_{ij}^{\Psi}p^2 + \gamma \text{th}(h/2]/A_{ij};$$
  

$$W_{12}(p) = \Xi_1(p)/F_1(p) = -\chi_{ij}^{\Psi}[M_2\chi_{ij}^{\Psi}p^2 + \gamma/\text{th}(h)]/A_{ij};$$
  

$$W_{13}(p) = \Xi_1(p)/F_2(p) = W_{22}(p) = \Xi_2(p)/F_1(p) =$$
  

$$= [\chi_{ij}^{\Psi}\gamma[\text{sh}(h)]/A_{ij};$$

$$W_{23}(p) = \Xi_2(p)/F_2(p) = -\chi_{ij}^{\Psi} [M_1 \chi_{ij}^{\Psi} p^2 + \gamma/\text{th}(h\gamma)]/A_{ij}.$$

Следовательно, для (19) получаем обобщенную параметрическую структурную схему электромагнитоупругого актюатора и матричное уравнение

$$\begin{pmatrix} \Xi_{1}(p) \\ \Xi_{2}(p) \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) & W_{13}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) & W_{23}(p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_{m}(p) \\ F_{1}(p) \\ F_{2}(p) \end{pmatrix}.$$
(20)

Рассмотрим работу электромагнитоупругого актюатора в установившемся режиме при  $\Psi_m(t) = = \Psi_{m0} \cdot 1(t), F_1(t) = F_2(t) = 0$  и инерционной нагрузке актюатора. Статическое перемещение торцов актюатора  $\xi_1(\infty)$  и  $\xi_2(\infty)$  записывается в виде

$$\xi_{1}(\infty) = \lim_{t \to \infty} \xi_{1}(t) = \lim_{\substack{p \to 0 \\ \alpha \to 0}} pW_{11}(p)\Psi_{m0}/p =$$
  
=  $v_{mi}l\Psi_{m0}(M_{2} + m/2)/(M_{1} + M_{2} + m);$  (21)  
$$\xi_{2}(\infty) = \lim_{t \to \infty} \xi_{2}(t) = \lim_{\substack{p \to 0 \\ \alpha \to 0}} pW_{21}(p)\Psi_{m0}/p =$$
  
=  $v_{mi}l\Psi_{m0}(M_{1} + m/2)/(M_{1} + M_{2} + m);$  (22)

$$\xi_{1}(\infty) + \xi_{2}(\infty) = \lim_{t \to \infty} (\xi_{1}(t) + \xi_{2}(t)) =$$
$$= v_{mi} l \Psi_{m0}, \qquad (23)$$

где *m* — масса актюатора;  $M_1$ ,  $M_2$  — массы нагрузки. Для пьезоактюатора из пьезокерамики ЦТС при продольном пьезоэффекте при  $m \ll M_1$  и  $m \ll M_2$  при  $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$  м/В, U = 50 В,  $M_1 = 10$  кг и  $M_2 = 40$  кг получаем статическое перемещение торцов пьезоактюатора  $\xi_1(\infty) = 16$  нм,  $\xi_2(\infty) = 4$  нм,  $\xi_1(\infty) +$  $+ \xi_2(\infty) = 20$  нм.

При подаче напряжения  $U(t) = U_0 \cdot 1(t)$  статическое перемещение торцов пьезоактюатора при поперечном пьезоэфекте определяется формулами

$$\xi_{1}(\infty) = d_{31}(h/\delta) U_{0}(M_{2} + m/2)/(M_{1} + M_{2} + m); \quad (24)$$
  

$$\xi_{2}(\infty) = d_{31}(h/\delta) U_{0}(M_{1} + m/2)/(M_{1} + M_{2} + m); \quad (25)$$

$$\xi_1(\infty) + \xi_2(\infty) = d_{31}(h/\delta) U_0.$$
 (26)

Для пьезоактюатора из пьезокерамики ЦТС или РZТ при поперечном пьезоэффекте при  $m \ll M_1$  и  $m \ll M_2$  в случае  $d_{31} = 2,5 \cdot 10^{-10}$  м/В,  $h = 4 \cdot 10^{-2}$  м,  $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$  м, U = 50 В,  $M_1 = 10$  кг и  $M_2 = 40$  кг получаем статическое перемещение торцов  $\xi_1(\infty) = 200$  нм,  $\xi_2(\infty) = 50$  нм,  $\xi_1(\infty) + \xi_2(\infty) = 250$  нм.

Из формул (19), (20) получаем передаточные функции пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с одним жестко закрепленным торцом, например, при  $M_1 \to \infty$  в виде

$$W_{21}(p) = \Xi_2(p)/E_3(p) = d_{33}\delta/[M_2\delta\chi_{33}^E p^2 + \delta\gamma \text{cth}(\delta\gamma)]; (27)$$
$$W_{23}(p) = \Xi_2(p)/F_2(p) =$$
$$= -\delta\chi_{33}^E/[M_2\delta\chi_{33}^E p^2 + \delta\gamma \text{cth}(\delta\gamma)].$$
(28)

Найдем для пьезоактюатора при продольном пьезоэфекте и одной жестко закрепленной грани пьезоактюатора величину перемещения  $\xi_2(\infty)$  в установившемся режиме при  $U(t) = U_0 \cdot 1(t)$  и  $F_2(t) = 0$  или  $F_2(t) = F_0 \cdot 1(t)$  и U(t) = 0. Статическое перемещение пьезоактюатора  $\xi_2(\infty)$  в зависимости от напряжения или силы имеет вид

$$\xi_2(\infty) = \lim_{t \to \infty} \xi_2(t) = \lim_{p \to 0} p W_2(p) U_0/p = d_{33} U_0;$$
(29)

$$\xi_2(\infty) = \lim_{p \to 0} p W_{23}(p) F_0/p = -\delta s_{33}^E F_0/S_0.$$
(30)

Для пьезоактюатора из пьезокерамики ЦТС или РZТ при продольном пьезоэффекте в случае  $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$  м/В, U = 150 В получаем статическое перемещение  $\xi_2(\infty) = 60$  нм. При  $\delta = 6 \cdot 10^{-4}$  м,  $s_{33}^E = 3.5 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/H,  $F_0 = 500$  H,  $S_0 = 1.75 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> значение  $\xi_2(\infty) = -60$  нм.

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, Том 19, № 4, 2017 -

231

Используя в передаточных функциях пьезоактюатора (29) и (30) аппроксимацию гиперболического котангенса двумя членами степенного ряда, получаем при  $M_1 \rightarrow \infty$  и  $m \ll M_2$  в диапазоне частот  $0 < \omega < 0.01 c^E/\delta$  выражения

$$W_{21}(p) = \Xi_2(p)/E_3(p) =$$
  
=  $d_{33}\delta/(T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1);$  (31)

$$W_{23}(p) = \Xi_2(p)/F_2(p) =$$
  
=  $-(s_{33}^E \delta/S_0)/(T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1);$  (32)

$$T_{t} = (\delta/c^{E}) \sqrt{M_{2}/m} = \sqrt{M_{2}/C_{33}^{E}},$$
  
$$\xi_{t} = (\alpha\delta/3) \sqrt{m/M_{2}}, \quad C_{33}^{E} = S_{0}/(s_{33}^{E}\delta) = 1/(\chi_{33}^{E}\delta),$$

где  $T_t$  — постоянная времени;  $\xi_t$  — коэффициент затухания;  $C_{33}^E$  — жесткость пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте.

В статическом режиме работы пьезоактюатора при упругой нагрузке получаем выражение перемещения торца пьезоактюатора в виде

$$\xi_2 = \frac{\xi_{2m}}{1 + C_e / C_{33}^E},\tag{33}$$

где  $\xi_2$  — перемещение пьезоактюатора при упругой нагрузке;  $\xi_{2m} = d_{33}U_0$  — максимальное перемещение пьезоактюатора;  $C_e$  — жесткость нагрузки.

Из формул (31), (33) для пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с одним жестко закрепленным торцом и упругоинерционной нагрузке получаем передаточную функцию

$$W_{2}(p) = \frac{\Xi_{2}(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}}{(1 + C_{e}/C_{33}^{E})(T_{t}^{2}p^{2} + 2T_{t}\xi_{t}p + 1)},$$
 (34)

где  $T_t$  — постоянная времени;  $\xi_t$  — коэффициент затухания;  $C_{33}^E$  — жесткость пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте

$$T_{t} = \sqrt{M_{2}/(C_{e} + C_{33}^{E})},$$
  
$$\xi_{t} = \alpha \delta^{2} C_{33}^{E} / \left( 3c^{E} \sqrt{M(C_{e} + C_{33}^{E})} \right)$$

Соответственно для пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с одним жестко закрепленным торцом и упругоинерционной нагрузке при  $M_1 \rightarrow \infty$  и  $m \ll M_2$  при  $M_2 = 10$  кг,  $C_{33}^E =$  $= 2,3 \cdot 10^6$  H/м,  $C_e = 0,2 \cdot 10^6$  H/м получаем постоянную времени  $T_t = 2 \cdot 10^{-3}$  с. Экспериментальные и расчетные характеристики пьезоактюатора совпадают с погрешностью 5 %.

### Заключение

Получены обобщенная структурно-параметрическая модель электромагнитоупругого актюатора для нано- и микросистемной техники, его параметрическая структурная схема и передаточные функции.

Определены структурно-параметрические модели, параметрические структурные схемы и передаточные функции пьезоактюатора. Динамические и статические характеристики пьезоактюатора получены с учетом граничных условий, физических параметров пьезоактюатора, внешней нагрузки и электрического сопротивления согласующих цепей.

#### Список литературы

1. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 144 с.

2. Афонин С. М. Пьезопреобразователи для приводов микроперемещений // Приборы и системы управления. 1998. № 2. С. 41-42.

3. Панич А. Е., Смотраков В. Г., Еремкин В. В., Вусевкер Ю. А. Перспективы применения электрострикционных материалов // Микросистемная техника. 2002. № 2. С. 21–24.

4. Uchino K. Piezoelectric actuator and ultrasonic motors. Boston, MA: Kluwer Academic Publisher, 1997. 347 p.

5. Партон В. З., Кудрявцев Б. А. Электромагнитоупругость пьезоэлектрических и электропроводных тел. М.: Наука, 1988. 470 с.

6. Акопьян В. А., Панич А. Е., Соловьев А. Н., Шевцов С. Н. Некоторые физико-механические проблемы пьезоэлектрических актюаторов и области их применения // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 10. С. 35–40.

7. Афонин С. М. Исследование и расчет статических и динамических характеристик пьезоактюатора нано- и микроперемещений // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 3. С. 34—41.

8. Казаков В. К., Климашин В. М., Никифоров В. Г., Сафронов А. Я., Чернов В. А. Многослойные пьезоэлектрические актюаторы и особенности их применения // Компоненты и технологии. 2007. № 6. С. 62—65.

9. **Borboni A.** Meso- to micro-actuators: a theoretical and practical approach. New York: CRC Press. 2008. 400 p.

10. **Yang Y., Tang L.** Equivalent circuit modeling of piezoelectric energy harvesters // Journal of intelligent material systems and structures. 2009. v. 20. no. 18, P. 2223–2235.

11. Cady W. G. Piezoelectricity: An introduction to the theory and applications of electromechancial phenomena in crystals. New York, London: McGraw-Hill Book Company, 1946. 806 p.

12. **Physical** acoustics: Principles and methods. Vol. 1. Part A. Methods and devices. Ed.: W. Mason. New York: Academic Press, 1964. 515 p.

13. Полянин А. Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Физматлит. 2001. 576 с.

14. **Афонин С. М.** Абсолютная устойчивость системы управления деформацией пьезоактюатора нано- и микроперемещений // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 11. С. 47—52.

15. Афонин С. М. Решение матричных уравнений в задачах электроупругости для многослойных актюаторов наноперемещений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 8. С. 39—45.

16. Афонин С. М. Решение волнового уравнения в задачах электромагнитоупругости для актюаторов нано- и микроперемещений // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 2. С. 26—32.

17. **Афонин С. М.** Характеристики многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений с параллельным и кодовым управлением // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 4. С. 32—41.

18. **Афонин С. М.** Статические характеристики и упругие податливости многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 1. С. 40—48.

19. Ленк А. Электромеханические системы. Системы с сосредоточенными параметрами. М.: Мир, 1978. 284 с.

20. **Springer** handbook of nanotechnology. Ed. by B. Bhushan. Berlin, New York: Springer, 2004. 1222 p.

21. **Encyclopedia** of nanoscience and nanotechnology. Ed. by H. S. Nalwa. Calif.: American Scientific Publishers. 10 Volume Set, 2004.

22. **Zhou S., Yao Z.** Design and optimization of a modal-independent linear ultrasonic motor // IEEE transaction on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2014. Vol. 61, N. 3. P. 535–546.

**S. M. Afonin**, Associate Professor, Senior Researcher, eduems@mail.ru, National Research University of Electronic Technology, Moscow, 124498, Russian Federation

### Corresponding author:

Afonin Sergey M., Associate Professor, National Research University of Electronic Technology, Moscow, 124498, Russian Federation, e-mail: eduems@mail.ru

# Structural-Parametric Models of Electromagnetoelastic Actuators for Nano- and Microsystems Technology

Received on December 29, 2016 Accepted on January 21, 2017

Structural-parametric models, parametrical block diagrams, transfer functions of the electromagnetoelastic actuators for the nano- and microsystem technologies were obtained. On the basis of a wave equation, a general structural-parametric model and a general parametrical block diagram of the electromagnetoelastic actuators were constructed. Application of the piezoactuators for nanoand micro displacements was recognized as promising for nanotechnologies, nanobiology, photonics, power engineering, microelectronics and astronomy for precision alignment and compensation for the thermal and gravitational deformations. The static and dynamic characteristics of the piezoactuators for the nano- and microsystem technologies were investigated.

**Keywords:** structural-parametric model, parametrical block diagram, electromagnetoelastic actuator, piezoactuator, deformation, nano- and microdisplacements, transfer function

### For citation:

Afonin S. M. Structural-Parametric Models of Electromagnetoelastic Actuators for Nano- and Microsystems Technology, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 227–238.

DOI: 10.17587/nmst.19.227-238

### Introduction

The electromagnetoelastic actuators on the basis of electromagnetoelasticity (piezoelectric, piezomagnetic, electrostriction and magnetostriction effects) are applied in the equipment for nano- and microsystem technologies, nanotechnologies, nanobiology, power engineering, microelectronics and adaptive optics for precision combination, compensation for temperature and gravitational deformations, and atmospheric turbulence by correction of the wave front. Piezoactuator is a piezomechanical device, which actuates mechanisms, systems or their controls, based on the piezoelectric effect and transforms the electric signals into a mechanical displacement and force. Piezoactuators have high piezomodules and rigiditys, and, therefore, they are applied for nano- and microdisplacements. Piezoactuators work on the basis of the inverse piezoelectric effect, in which a result of displacement is reached after application of the electric voltage due to deformation of a piezoactuator in the range from units of nanometers

up to units of micrometers with a margin error within the tenth shares of a nanometer [1-9].

For application of the transfer functions of the electromagnetoelastic actuator for the nano- and microsystem technologies we shall use a structural-parametrical actuator model as opposed to the electric equivalent schemes of the piezoelectric transducers [10-12] for calculation of the piezotransmitters and piezoreceivers. On the basis of a solution to the wave equation taking into account the equation of electromagnetoelasticity and boundary conditions at two end faces of an actuator we get a structural-parametrical model of an electromagnetoelastic actuator in the form of a system of equations and its transfer functions.

The piezoactuators ensure high efforts and speeds of operation, they are used for combining and scanning in the nanomanipulators for the scanning tunnel microscopes (STM), the scanning power microscopes (SPM), and the atomic-force microscopes (AFM). The nanomanipulators with the piezoactuators are applied in

the nano-robot systems for nano- and microdisplacements. The piezoactuators for the nano- and the microsystem technologies are used in the linear nano- and microdrives and micropumps. In photonics the piezoactuators are applied for the nano- and microdisplacements of the laser mirrors for the optical methods of information and energy transfer, and for adjustment of the laser mirrors of the ring gyroscopes. The piezoactuators are used in the adaptive optics of big telescopes, for example, European Extremely Large Telescope (E-ELT) and Large Synoptic Survey Telescope (LSST). The piezoactuators are applied for correction of deformations and vibrations of the hulls and blades of helicopters and planes in the airspace technologies, adjustment of the space telescopes, and microdrives of tools in microsurgery and biotechnology. The piezoactuators are made of the piezoelectric ceramics on the basis of zirconate and titanate of lead of TsTS or PZT brands. for example, TsTS-19, TsTS-21, TsTS-23, TsTS-26Ts, TsTS-36, TsTS-42, TsTS-43, TsTS-46, TsTS-47, TsTS-48, NTsTS-1, NTsTBS-1, TsTBS-3, TsTBS-7, PKR-7, PKR-7M or PZT-4, PZT-5H [1-22].

### Structural-parametrical models of actuators

Deformation of a piezoactuator corresponds to its stress state [7, 15]. If mechanical stress T is created in a piezoactuator, there will be deformation S. There are six stress components:  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_5$ ,  $T_6$ , out of them  $T_1-T_3$  belong to the stretching-compression stresses,  $T_4-T_6$  — to the shift stresses. The matrix equations of the state [12], connecting the electric and elastic variables for the polarized piezoceramics, look like the following

$$\mathbf{D} = \mathbf{dT} + \mathbf{\varepsilon}^T \mathbf{E}; \tag{1}$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d}^T \mathbf{E}.$$
 (2)

Here the first equation describes the direct piezoelectric effect, and the second — the inverse piezoelectric effect; **D** — matrix-column of the electric induction on the co-ordinate axes; **S** — matrix-column of the relative deformations; **T** — matrix-column of the mechanical stresses; **E** — matrix-column of the intensity of the electric field on the co-ordinate axes; **d** — matrix of the piezoelectric modules;  $\varepsilon^{T}$  — matrix of the dielectric permeabilities at T = const;  $\mathbf{s}^{E}$  — matrix of the elastic compliances at E = const. The direction of polarization vector P, that is, the direction in which polarization of the piezoactuator was done for the longitudinal and transverse piezoeffect, is assumed as the direction of axis 3.

In general the equation of electromagnetoelasticity [12] of the actuator looks like the following:

$$S_i = s_{ij}^{E, H, \Theta} T_j + d_{mi}^{H, \Theta} E_m + d_{mi}^{E, \Theta} H_m + \alpha_i^{E, H} \Delta\Theta, (3)$$

where  $S_i$  — relative deformation of the electromagnetoelastic actuator on axis *i*;  $s_{ij}^{E, H, \Theta}$  — elastic compliance at E = const, H = const,  $\Theta = \text{const}$ ;  $T_j$  — mechanical stress in the actuator on axis *j*;  $d_{mi}^{H,\Theta}$  — piezomodule;  $E_m$  — intensity of the electric field in the actuator on axis *m*;  $d_{mi}^{E,\Theta}$  — magnetostriction constant;  $H_m$  — intensity of the magnetic field in the actuator on axis *m*;  $\alpha_i^{E, H}$  — coefficient of thermal expansion;  $\Delta\Theta$  temperature change of the actuator; *i*, *j* = 1, 2, ..., 6; m = 1, 2, 3.

In fig. 1 the piezoactuator at the longitudinal piezoeffect is a piezoplate with thickness  $\delta$  with electrodes at the end faces, perpendicular to axis 3. The area of the actuator is equal to  $S_0$ . For the structural-parametrical model of the piezoactuator we will solve together the wave equation, the equation of the converse piezoeffect and the equation of the forces on its facets. For calculation of the piezoactuator the wave equation [12–18] is used describing the wave propagation in a long line with attenuation without distortions.

$$\frac{1}{(c^E)^2} \frac{\partial^2 \xi(x,t)}{\partial t^2} + \frac{2\alpha}{c^E} \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial t} + \alpha^2 \xi(x,t) = \frac{\partial^2 \xi(x,t)}{\partial x^2}, \quad (4)$$

where  $c^E$  — speed of propagation of an elastic wave at  $E = \text{const}; \xi$  — section displacement of the piezoactuator;  $\alpha$  — coefficient of attenuation of oscillations due to the energy scattering because of the thermal losses during the wave propagation in the piezoactuator.

By means of Laplace transformation [13] the initial task for the equation with private derivatives of a hyperbolic type — the wave equation (4) is reduced to a simpler task for the linear ordinary differential equation with parameter p, where p is the transformation parameter. By applying Laplace transformation [13] to the wave equation (4) and assuming the initial conditions as zero, we receive the following linear ordinary differential equation

$$\frac{d^2\Xi(x,p)}{dx^2} - \left[\frac{1}{(c^E)^2}p^2 + \frac{2\alpha}{c^E}p + \alpha^2\right]\Xi(x,p) = 0, \quad (5)$$

the solution to which will be function

$$\Xi(x, p) = C \mathbf{e}^{-x\gamma} + B \mathbf{e}^{x\gamma}, \qquad (6)$$

where  $\Xi(x, p)$  — Laplace transformation of the section displacement of the piezoactuator;  $\gamma = p/c^E + \alpha$  — propagation coefficient.

Let us determine coefficients C and B in the following way:

$$C = (\Xi_1 \mathbf{e}^{\delta \gamma} - \Xi_2) / [2 \mathrm{sh}(\delta \gamma)];$$
  
$$B = (\Xi_1 \mathbf{e}^{-\delta \gamma} - \Xi_2) / [2 \mathrm{sh}(\delta \gamma)], \qquad (7)$$

Therefore, we get the following solution to the equation (5):

$$\Xi(x, p) = \{\Xi_1(p) \operatorname{sh}[(\delta - x)\gamma]\} + \Xi_2(p) \operatorname{sh}[(x\gamma)] / \operatorname{sh}(\delta\gamma).$$
(8)

The equations for Laplace transformation of the forces at two end faces of the piezoactuator:

$$T_{3}(0, p)S_{0} = F_{1}(p) + M_{1}p^{2}\Xi_{1}(p) \text{ at } x = 0,$$
  
$$T_{3}(\delta, p)S_{0} = -F_{2}(p) + M_{2}p^{2}\Xi_{1}(p) \text{ at } x = \delta, \qquad (9)$$

where the corresponding Laplace transformations for the expressions of the mechanical stresses  $T_3(0, p)$  and  $T_3(\delta, p)$  of the piezoactuator at the longitudinal piezoeffect are defined from the equation of the inverse piezoeffect:

$$T_{3}(0, p) = \frac{1}{s_{33}^{E}} \left. \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \right|_{x=0} - \frac{d_{33}}{s_{33}^{E}} E_{3}(p);$$
  
$$T_{3}(\delta, p) = \frac{1}{s_{22}^{E}} \left. \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \right|_{x=\delta} - \frac{d_{33}}{s_{22}^{E}} E_{3}(p), \quad (10)$$

where  $d_{33}$  – longitudinal piezomodule;  $s_{33}^E$  – elastic compliance on axis 3 at E = const.

Taking into account the solutions of the linear ordinary differential equation (5) we get a system of equations for the structural-parametrical model of the piezoactuator at the longitudinal piezoeffect and voltage control:

$$\Xi_{1}(p) = [1/M_{1}p^{2}]\{-F_{1}(p) + (1/\chi_{33}^{E})[d_{33}E_{3}(p) - [\gamma/\text{sh}(\delta\gamma)][\text{ch}(\delta\gamma)\Xi_{1}(p) - \Xi_{2}(p)]]\};$$
  
$$\Xi_{2}(p) = [1/M_{2}p^{2})]\{-F_{2}(p) + (1/\chi_{33}^{E})[d_{33}E_{3}(p) - [\gamma/\text{sh}(\delta\gamma)][\text{ch}(\delta\gamma)\Xi_{2}(p) - \Xi_{1}(p)]]\},$$
(11)

where  $\chi_{33}^E = s_{33}^E / S_0$ . The parametrical block diagram of the piezoactuator at the longitudinal piezoeffect is presented in fig. 2.

Let us consider the piezoactuator at a shift piezoeffect (2) (fig. 3).

Accordingly, for the piezoactuator at a shift piezoeffect we find coefficients C and B

$$C = (\Xi_1 \mathbf{e}^{b\gamma} - \Xi_2) / [2\mathrm{sh}(b\gamma)];$$
  
$$B = (\Xi_1 \mathbf{e}^{-b\gamma} - \Xi_2) / [2\mathrm{sh}(b\gamma)], \qquad (12)$$

solution of equation (5) in the following form:

$$\Xi(x, p) = \{\Xi_1(p)\operatorname{sh}[(b - x)\gamma)\} + \Xi_2(p)\operatorname{sh}[(x\gamma)\}/\operatorname{sh}(b\gamma) \quad (13)$$

and a system of equations for the structural-parametrical model of the piezoactuator at a shift piezoeffect and control voltage:

$$\Xi_{1}(p) = [1/M_{1}p^{2})]\{-F_{1}(p) + (1/\chi_{55}^{E})[d_{15}E_{1}(p) - [\gamma/sh(b\gamma)][ch(b\gamma)\Xi_{1}(p) - \Xi_{1}(p)]]\};$$
  
$$\Xi_{2}(p) = [1/M_{2}p^{2})]\{-F_{2}(p) + (1/\chi_{55}^{E})[d_{15}E_{1}(p) - [\gamma/sh(b\gamma)][ch(b\gamma)\Xi_{2}(p) - \Xi_{1}(p)]]\},$$
(14)

where  $\chi_{55}^E = s_{55}^E / S_0$ ;  $d_{15}$  — shift piezomodule;  $s_{55}^E$  — elastic compliance on axis 5 at E = const. The parametrical block diagram of the piezoactuator at a shift piezoeffect is presented in fig. 4.

Similarly, for the piezoactuator at a transverse piezoeffect we get constants C and B

$$C = (\Xi_1 \mathbf{e}^{h\gamma} - \Xi_2) / [2\mathrm{sh}(h\gamma)];$$
  
$$B = (\Xi_1 \mathbf{e}^{-h\gamma} - \Xi_2) / [2\mathrm{sh}(h\gamma)], \qquad (15)$$

solution of equation (5) in the following form:

$$\Xi(x, p) = \{\Xi_1(p)\operatorname{sh}[(h - x)\gamma)\} + \\ + \Xi_2(p)\operatorname{sh}[(x\gamma)\}/\operatorname{sh}(h\gamma)$$
(16)

and a system of equations for the structural-parametrical model of the piezoactuator at a transverse piezoeffect and control voltage:

$$\Xi_{1}(p) = [1/M_{1}p^{2})]\{-F_{1}(p) + (1/\chi_{11}^{E})[d_{31}E_{3}(p) - [\gamma/\text{sh}(h\gamma)][\text{ch}(h\gamma)\Xi_{1}(p) - \Xi_{1}(p)]]\};$$
  
$$\Xi_{2}(p) = [1/M_{2}p^{2})]\{-F_{2}(p) + (1/\chi_{11}^{E})[d_{31}E_{3}(p) - [\eta]]\}$$

$$- [\gamma/\text{sh}(h\gamma)][\text{ch}(h\gamma)\Xi_2(p) - \Xi_1(p)]]\}, \qquad (17)$$

where  $\chi_{11}^E = s_{11}^E / S_0$ ;  $d_{31}$  — transverse piezomodule;  $s_{11}^E$  — elastic compliance on axis 1 at E = const.

From formulas (2), (3), (11), (14), (17) we get a system of equations for a generalized structural-parametrical model of the electromagnetoelastic actuator in the following form:

$$\Xi_{1}(p) = [1/M_{1}p^{2})]\{-F_{1}(p) + (1/\chi_{ij}^{\Psi})[\nu_{mi}\Psi_{m}(p) - [\gamma/\text{sh}(h)][\text{ch}(h)\Xi_{1}(p) - \Xi_{2}(p)]]\};$$
  
$$\Xi_{2}(p) = [1/M_{2}p^{2})]\{-F_{2}(p) + (1/\chi_{ij}^{\Psi})[\nu_{mi}\Psi_{m}(p) - [\gamma/\text{sh}(h)][\text{ch}(h)\Xi_{2}(p) - \Xi_{1}(p)]]\},$$
(18)

$$\chi_{ij}^{\Psi} = s_{ij}^{\Psi} / S_0, \quad \nu_{mi} = \begin{cases} d_{33}, d_{31}, d_{15} \\ g_{33}, g_{31}, g_{15} \\ d_{33}, d_{31}, d_{15} \end{cases}, \quad \Psi_m = \begin{cases} E_3, E_1 \\ D_3, D_1 \\ H_3, H_1 \end{cases}$$

$$s_{ij}^{\Psi} = \begin{cases} s_{33}^{E}, s_{11}^{E}, s_{55}^{E} \\ s_{33}^{D}, s_{11}^{D}, s_{55}^{D}, \\ s_{33}^{H}, s_{11}^{H}, s_{55}^{H} \end{cases}, c^{\Psi} = \begin{cases} c^{E} \\ c^{D}, \\ c^{H} \end{cases}, \gamma = \begin{cases} \gamma^{E} \\ \gamma^{D}, \\ q^{H} \end{cases}, l = \begin{cases} \delta \\ h, \\ b \end{cases}$$

where parameters *E*, *D* and *H* refer to the voltage control, current for the reverse piezoeffect and intensity of the magnetic field for magnetostriction, at that,  $\chi_{ij}^{\Psi} = s_{ij}^{\Psi}/S_0$ ;  $s_{ij}^{\Psi}$  — elastic compliance at  $\Psi = \text{const}$ ;  $d_{33}, d_{31}, g_{15}$  — piezoelectric modules and magnetostriction;  $g_{33}, g_{31}, g_{15}$  — piezoelectric constants;  $c^{\Psi}$  — speed of sound at  $\Psi = \text{const}$ ; *l* — geometrical size in the deformation direction accordingly equal to  $\delta$ , *h*, *b* thickness, height or width of the electromagnetoelastic

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, Том 19, № 4, 2017 -

actuator;  $S_0$  — area of the corresponding cross-section of the actuator. The generalized parametrical block diagram of the electromagnetoelastic actuator in fig. 5 corresponds to the system of equations (18) of the generalized structural-parametrical model of the actuator.

### Transfer functions of the actuator

From the system of equations for the generalized structural-parametrical model of the electromagnetoelastic actuator for the nano- and microsystem technologies we get the transfer functions of the actuator as the relation of the transformed according to Laplace expressions of displacements of the end faces of the actuator to the expression of the corresponding input parameter or the corresponding force at the zero initial conditions. The solution to the system of equations (18) for the displacements of two facets of the electromagnetoelastic actuator [14–17] is provided by

$$\Xi_{1}(p) = W_{11}(p)\Psi_{m}(p) + W_{12}(p)F_{1}(p) + W_{13}(p)F_{2}(p);$$
  

$$\Xi_{2}(p) = W_{21}(p)\Psi_{m}(p) + W_{22}(p)F_{1}(p) + W_{23}(p)F_{2}(p),$$
(19)

where the generalized transfer functions of the electromagnetoelastic actuator are

$$\begin{split} W_{11}(p) &= \Xi_1(p)/\Psi_m(p) = v_{mi} [M_2 \chi_{ij}^{\Psi} p^2 + \gamma \text{th}(h\gamma/2]/A_{ij}; \\ A_{ij} &= M_1 M_2 (\chi_{ij}^{\Psi})^2 p^4 + \{(M_1 + M_2) \chi_{ij}^{\Psi}/[c^{\Psi} \text{th}(h\gamma)]\} p^3 + \\ &+ [(M_1 + M_2) \chi_{ij}^{\Psi} \alpha/\text{th}(h\gamma) + 1/(c^{\Psi})^2] p^2 + \\ &+ 2\alpha p/c^{\Psi} + \alpha^2; \\ W_{21}(p) &= \Xi_2(p)/\Psi_m(p) = v_{mi} [M_1 \chi_{ij}^{\Psi} p^2 + \gamma \text{th}(h\gamma/2]/A_{ij}; \\ W_{12}(p) &= \Xi_1(p)/F_1(p) = -\chi_{ij}^{\Psi} [M_2 \chi_{ij}^{\Psi} p^2 + \gamma/\text{th}(h\gamma)]/A_{ij}; \\ W_{13}(p) &= \Xi_1(p)/F_2(p) = W_{22}(p) = \Xi_2(p)/F_1(p) = \\ &= [\chi_{ij}^{\Psi} \gamma[\text{sh}(h\gamma)]/A_{ij}; \end{split}$$

 $W_{23}(p) = \Xi_2(p)/F_2(p) = -\chi_{ij}^{\Psi} [M_1 \chi_{ij}^{\Psi} p^2 + \gamma/\text{th}(h)]/A_{ij}.$ 

Hence, for (19) we get a generalized parametrical block diagram of the electromagnetoelastic actuator and the matrix equation:

$$\begin{pmatrix} \Xi_{1}(p) \\ \Xi_{2}(p) \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) & W_{13}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) & W_{23}(p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_{m}(p) \\ F_{1}(p) \\ F_{2}(p) \end{pmatrix}.$$
(20)

Let us consider operation of the electromagnetoelastic actuator in the established mode at  $\Psi_m(t) = \Psi_{m0} \cdot 1(t)$ ,  $F_1(t) = F_2(t) = 0$  and the inertial load of the actuator. The static displacement of the end faces of the actuator  $\xi_1(\infty)$  and  $\xi_2(\infty)$  are written in the following form:

$$\xi_{1}(\infty) = \lim_{t \to \infty} \xi_{1}(t) = \lim_{\substack{p \to 0 \\ \alpha \to 0}} pW_{11}(p)\Psi_{m0}/p =$$
$$= v_{mi} l \Psi_{m0} (M_{2} + m/2) / (M_{1} + M_{2} + m); \qquad (21)$$

$$\xi_{2}(\infty) = \lim_{t \to \infty} \xi_{2}(t) = \lim_{\substack{p \to 0 \\ \alpha \to 0}} p W_{21}(p) \Psi_{m0}/p =$$

$$\xi_{1}(\infty) + \xi_{2}(\infty) = \lim_{t \to \infty} (\xi_{1}(t) + \xi_{2}(t)) = v_{mi} l \Psi_{m0},$$
 (23)

where m — mass of the actuator;  $M_1$ ,  $M_2$  — masses of the loads. For the piezoactuator from TsTS or PZT piezoceramics at a longitudinal piezoeffect at  $m \ll M_1$ and  $m \ll M_2$  at  $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$  m/V, U = 50 V,  $M_1 = 10$  kg and  $M_2 = 40$  kg we get the static displacement of the end faces of the actuator  $\xi_1(\infty) = 16$  nm,  $\xi_2(\infty) = 4$  nm,  $\xi_1(\infty) + \xi_2(\infty) = 20$  nm.

When voltage  $U(t) = U_0 \cdot 1(t)$  is supplied, the static displacement of the end faces of the actuator at the longitudinal piezoeffect is defined by the following formulas:

$$\xi_{1}(\infty) = d_{31}(h/\delta) U_{0}(M_{2} + m/2)/(M_{1} + M_{2} + m); (24)$$
  

$$\xi_{2}(\infty) = d_{31}(h/\delta) U_{0}(M_{1} + m/2)/(M_{1} + M_{2} + m); (25)$$
  

$$\xi_{1}(\infty) + \xi_{2}(\infty) = d_{31}(h/\delta) U_{0}.$$
(26)

For the piezoactuator from TsTS or PZT piezoceramics at a transverse piezoeffect at  $m \ll M_1$  and  $m \ll M_2$ in case of  $d_{31} = 2.5 \cdot 10^{-10}$  m/V,  $h = 4 \cdot 10^{-2}$  m,  $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$  m, U = 50 V,  $M_1 = 10$  kg and  $M_2 = 40$  kg we get the following static displacement of the end faces of the actuator:  $\xi_1(\infty) = 200$  nm,  $\xi_2(\infty) = 50$  nm,  $\xi_1(\infty) + \xi_2(\infty) = 250$  nm.

From (19), (20) we get the transfer functions of the piezoactuator at the longitudinal piezoeffect with one rigidly fixed end face of the actuator, for example, at  $M_1 \rightarrow \infty$  in the following form:

$$W_{21}(p) = \Xi_2(p)/E_3(p) = d_{33}\delta/[M_2\delta\chi_{33}^E p^2 + \delta\gamma \text{cth}(\delta\gamma)]; (27)$$
$$W_{23}(p) = \Xi_2(p)/F_2(p) =$$
$$= -\delta\chi_{33}^E/[M_2\delta\chi_{33}^E p^2 + \delta\gamma \text{cth}(\delta\gamma)].$$
(28)

Let us find the value of displacement  $\xi_2(\infty)$  for the piezoactuator at the longitudinal piezoeffect and one rigidly fixed facet in the established mode at  $U(t) = U_0 \cdot 1(t)$ and  $F_2(t) = 0$  or  $F_2(t) = F_0 \cdot 1(t)$  and U(t) = 0. The static displacement of the piezoactuator  $\xi_2(\infty)$  depending on voltage looks like the following:

$$\xi_2(\infty) = \lim_{t \to \infty} \xi_2(t) = \lim_{p \to 0} p W_2(p) U_0/p = d_{33} U_0, \quad (29)$$

$$\xi_2(\infty) = \lim_{p \to 0} p W_{23}(p) F_0/p = -\delta s_{33}^E F_0/S_0.$$
(30)

For the piezoactuator from TsTS or PZT piezoceramics at the longitudinal piezoeffect in case of  $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$  m/V, U = 150 V we get static displacement  $\xi_2(\infty) = 60$  nm. At  $\delta = 6 \cdot 10^{-4}$  m,  $s_{33}^E = 3.5 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/N,  $F_0 = 500$  N,  $S_0 = 1.75 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup> the value of  $\xi_2(\infty) = -60$  nm.

By using in the transfer functions of the piezoactuator (29) and (30) an approximation of the hyperbolic cotangent by two members of a power series, at  $M_1 \rightarrow \infty$  and  $m \ll M_2$  in the range of frequencies  $0 \le \omega \le 0.01 c^E / \delta$  we get the following expressions:

$$W_{21}(p) = \Xi_2(p)/E_3(p) =$$
  
=  $d_{33}\delta/(T_t^2 p^2 + 2T_t\xi_t p + 1);$  (31)  
 $W_{23}(p) = \Xi_2(p)/E_2(p) =$ 

$$w_{23}(p) = \Xi_2(p)/T_2(p) = -(s_{33}^E \delta/S_0)/(T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1); \qquad (32)$$

$$\begin{split} T_t &= (\delta/c^E) \sqrt{M_2/m} \; = \; \sqrt{M_2/C_{33}^E} \,, \\ \xi_t &= (\alpha \delta/3) \sqrt{m/M_2} \,, \quad C_{33}^E \; = \; S_0/(s_{33}^E \, \delta) \; = \; 1/(\chi_{33}^E \, \delta) \end{split}$$

where  $T_t$  – time constant,  $\xi_t$  – damping coefficient,  $C_{33}^E$  – rigidity of the piezoactuator at the longitudinal piezoeffect.

In the static mode of operation of the piezoactuator at an elastic load we get the following expression for the displacement of an end face of the piezoactuator:

$$\xi_2 = \frac{\xi_{2m}}{1 + C_{\rho}/C_{33}^E},\tag{33}$$

where  $\xi_2$  — displacement of the piezoactuator at an elastic load,  $\xi_{2m} = d_{33}U_0$  — maximal displacement of the piezoactuator,  $C_e$  — rigidity of the load. From formulas (31), (33) for the piezoactuator at

From formulas (31), (33) for the piezoactuator at the longitudinal piezoeffect with one end face rigidly fixed and an elastic-inertial load we get the following transfer function:

$$W_{2}(p) = \frac{\Xi_{2}(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}}{(1 + C_{e}/C_{33}^{E})(T_{t}^{2}p^{2} + 2T_{t}\xi_{t}p + 1)},$$
 (34)

where  $T_t$  – time constant,  $\xi_t$  – damping coefficient,  $C_{33}^E$  – rigidity of the piezoactuator at the longitudinal piezoeffect

$$T_t = \sqrt{M_2/(C_e + C_{33}^E)},$$
  
$$\xi_t = \alpha \delta^2 C_{33}^E / \left( 3c^E \sqrt{M(C_e + C_{33}^E)} \right).$$

Accordingly, for the piezoactuator at the longitudinal piezoeffect with one end face rigidly fixed and elastic-inertial load at  $M_1 \rightarrow \infty$  and  $m \ll M_2$  at  $M_2 = 10$  kg,  $C_{33}^E = 2.3 \cdot 10^6$  N/m,  $C_e = 0.2 \cdot 10^6$  N/m we get time constant  $T_t = 2 \cdot 10^{-3}$  s. The experimental and calculated characteristics of the piezoactuator coincide with a possible error of 5 %.

### Conclusion

A generalized structural-parametrical model of the electromagnetoelastic actuator for the nano- and microsystem technologies, its parametrical block diagram and transfer functions were obtained.

The structural-parametrical models, the parametrical block diagrams and the transfer functions of the piezoactuator were defined. The dynamic and static characteristics of the piezoactuator were obtained with account of the boundary conditions, physical parameters of the piezoactuator, external load and electric resistance of the matching circuits.

#### References

1. **Mironov V. L.** Osnovy skanirujushhej zondovoj mikroskopii, Moscow, Tehnosfera, 2004. 144 p. (in Russian).

2. Afonin S. M. P'ezopreobrazovateli dlja privodov mikroperemeshhenij, *Pribory i sistemy upravlenija*, 1998, no. 2, pp. 41– 42 (in Russian).

3. Panich A. E., Smotrakov V. G., Eremkin V. V., Vusevker Ju. A. Perspektivy primenenija jelektrostrikcionnyh materialov, *Mikrosistemnaya tekhnika*, 2002, no. 2, pp. 21–24 (in Russian).

4. Uchino K. Piezoelectric actuator and ultrasonic motors. Boston, MA: Kluwer Academic Publisher, 1997. 347 p.

5. **Parton V. Z., Kudrjavcev B. A.** *Jelektromagnitouprugost' p'ezojelektricheskih i jelektroprovodnyh tel*, Moscow, Nauka, 1988, 470 p. (in Russian).

6. Akop'jan V. A., Panich A. E., Solov'ev A. N., Shevcov S. N. Nekotorye fiziko-mehanicheskie problemy p'ezojelektricheskih aktjuatorov i oblasti ih primenenija, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2006, no. 10, pp. 35–40 (in Russian).

7. Afonin S. M. Issledovanie i raschet staticheskih i dinamicheskih harakteristik p'ezoaktjuatora nano- i mikroperemeshhenij, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2008, no. 3, pp. 34–41 (in Russian).

8. Kazakov V. K., Klimashin V. M., Nikiforov V. G., Safronov A. Ja., Chernov V. A. Mnogoslojnye p'ezojelektricheskie aktjuatory i osobennosti ih primenenija, *Komponenty i tehnologii*, 2007, no. 6, pp. 62–65 (in Russian).

9. Borboni A. Meso- to micro-actuators: a theoretical and practical approach. New York: CRC Press, 2008. 400 p.

10. Yang Y., Tang L. Equivalent circuit modeling of piezoelectric energy harvesters, *Journal of intelligent material systems* and structures, 2009, vol. 20, no. 18, pp. 2223–2235.

11. Cady W. G. Piezoelectricity: An introduction to the theory and applications of electromechancial phenomena in crystals. New York, London: McGraw-Hill Book Company, 1946. 806 p.

12. **Physical** *acoustics: Principles and methods.* Vol. 1. Part A. Methods and devices. Ed.: W. Mason. New York: Academic Press, 1964. 515 p.

13. Poljanin A. D. Spravochnik po linejnym uravnenijam matematicheskoj fiziki, Moscow, Fizmatlit. 2001. 576 p.

14. **Afonin S. M.** Absoljutnaja ustojchivosť sistemy upravlenija deformaciej p'ezoaktjuatora nano- i mikroperemeshhenij, *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika*, 2008, no. 11, pp. 47–52 (in Russian).

15. Afonin S. M. Reshenie matrichnyh uravnenij v zadachah jelektrouprugosti dlja mnogoslojnyh aktjuatorov nanoperemeshhenij, *Mekhatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2010, no. 8, pp. 39–45 (in Russian).

16. Afonin S. M. Reshenie volnovogo uravnenija v zadachah jelektromagnitouprugosti dlja aktjuatorov nano- i mikroper-

emeshhenij, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2014, no. 2, pp. 26–32 (in Russian).

17. **Afonin S. M.** Harakteristiki mnogoslojnyh p'ezoaktjuatorov nano- i mikroperemeshhenij s parallel'nym i kodovym upravleniem, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 4, pp. 32–41 (in Russian).

18. **Afonin S. M.** Staticheskie harakteristiki i uprugie podatlivosti mnogoslojnyh p'ezoaktjuatorov nano- i mikroperemeshhenij, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, no. 1, pp. 40–48 (in Russian). 19. Lenk A. Jelektromehanicheskie sistemy. Sistemy s sosredotochennymi parametrami. Moscow, Mir, 1978, 284 p. (in Russian).

20. **Springer** *handbook of nanotechnology*. Ed. by B. Bhushan. Berlin, New York: Springer, 2004. 1222 p.

21. **Encyclopedia** of nanoscience and nanotechnology. Ed. by H. S. Nalwa. Calif.: American Scientific Publishers. 10 Vol. Set, 2004.

22. Zhou S., Yao Z. Design and optimization of a modal-independent linear ultrasonic motor, *IEEE transaction on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 2014, vol. 61, no. 3, pp. 535–546.

### УДК 621.372.56

DOI: 10.17587/nmst19.238-243

В. Д. Садков, канд. техн. наук, доц., e-mail: sadvd2016@mail.ru, К. С. Фомина, студент Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева" (НГТУ)

## ПОГЛОЩАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ШИРОКОГО ДИАПАЗОНА ОСЛАБЛЕНИЙ

Поступила в редакцию 11.01.2017

Методом разделения переменных проведен расчет поглощающих элементов на основе кусочно-однородных резистивных структур, позволяющих реализовать в заданных размерах широкий диапазон ослаблений (от долей децибела до 80 дБ и более) за счет изменения отношения сопротивлений используемых резистивных пленок. Приведены результаты расчетов рассмотренных поглощающих элементов. Достоверность предложенной методики проверена моделированием в программном комплексе Elcut. Исследовано распределение плотности тока в поглощающих элементах. Предложена топология, обеспечивающая более равномерное распределение плотности тока и мощности по поверхности поглощающего элемента. Полученные результаты представляют интерес для построения малогабаритных CBY аттенюаторов и чипаттенюаторов широкого диапазона ослаблений.

Ключевые слова: пленочные поглощающие элементы, резистивные аттенюаторы

### Введение

Для построения широкополосных аттенюаторов используются поглощающие элементы (ПЭ) на основе распределенных резистивных структур [1].

Реализация как малых (единицы и доли децибела), так и больших (более 30 дБ) ослаблений на подложке заданных размеров встречает трудности. ПЭ больших ослаблений просто не умещаются на подложке, в то время как ПЭ малых ослаб-

лений при малой собственной длине имеют большую, зависящую от ослабления, длину входных/выходных контактов. Последние вносят плохо контролируемый вклад в ослабление в результате потерь в контактах и емкостной связи между ними [2, 3].

В работе предложены топологии и проведен расчет ПЭ на основе кусочно-однородных резистивных структур, обеспечивающих построение прецизионных малогабаритных аттенюаторов и чипаттенюаторов широкого диапазона ослаблений.

### Топология прямоугольного ПЭ и его расчет

Простейшая топология ПЭ с кусочно-однородной резистивной пленкой приведена на рис. 1. Требуемый диапазон ослаблений обеспечивается варьированием величин удельных поверхностных сопротивлений пленок  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Расчет ПЭ (в силу симметрии достаточно рассмотреть только его половину при  $y \ge 0$ ) сводится к решению краевой задачи для уравнения Лапласа в областях *I*—*III* 



Рис. 1. Поглощающий элемент с кусочно-однородной резистивной пленкой (a) в режиме антисимметричного (b) и симметричного возбуждения (c), (d) — структура (c) с обращенными краевыми условиями

Fig. 1. AE with a piecewise-homogeneous resistive film (a) in the antisymmetric (b) and symmetric modes of excitation (c), (d) — structure (c) with the inverted boundary conditions

(рис. 1, *a*) методом разделения переменных при следующих граничных условиях:

$$U_{I}(b, y) = U_{1}, \quad U_{I}(-b, y) = U_{2}, \quad U_{III}(x, c) = 0,$$
  

$$U_{I}(x, a) = U_{II}(x, a), \quad U_{II}(x, d) = U_{III}(x, d),$$
  

$$\frac{dU_{I}}{dy} = \frac{dU_{II}}{dy} \text{ при } y = a,$$
  

$$\frac{dU_{II}}{dy} = \Omega \frac{dU_{III}}{dy} \text{ при } y = d,$$
 (1)

где  $U_i(x, y)$  — поле потенциалов в *i*-й области ПЭ  $(i = I, II, III); \Omega = \rho_1/\rho_2$  — степень неоднородности резистивной пленки.

При антисимметричном возбуждении ПЭ  $(U_1 = -U_2 = 1)$  на линии  $\partial M_4$  U = 0 и для поля потенциалов структуры рис. 1, *b* получаем:

$$U_{I} = \frac{x}{b} + \sum_{n=0}^{\infty} A_{n} \operatorname{ch}(\alpha_{n} y) \sin(\alpha_{n} x);$$

$$U_{II} = \sum_{n=0}^{\infty} B_{n} \operatorname{ch}[\beta_{n}(y-a)] + \operatorname{ch}[\beta_{n}(d-y)] \sin(\beta_{n} x); \quad (2)$$

$$U_{III} = \sum_{n=0}^{\infty} C_{n} \operatorname{sh}(\beta_{n}(c-y)) \sin(\beta_{n} x);$$

$$\alpha_{m} = n\pi/b, \quad \beta_{n} = \pi(2n+1)/(2b).$$

Для определения коэффициентов  $A_n$ ,  $B_n$ ,  $C_n$  используем условия (1).

Проводимость  $Y_1$  структуры рис. 1, *b*, численно равную силе тока между контактами  $\partial M_4 M_3$  и  $M_1 M_2$ , находим по формуле

$$Y_1 = \frac{1}{\rho_1} \int_0^a \frac{dU_I}{dx} dy \text{ при } x = b.$$
(3)

При симметричном возбуждении ( $U_1 = U_2 = 1$ ) на линии  $\partial M_4 \, dU/dx = 0$  (структура рис. 1, *c*). Проводимость  $Y_2$  этой структуры удобно выразить через проводимость структуры рис. 1, *d* с обращенными краевыми условиями:

$$Y_2 = \frac{1}{\rho_1} \int_0^{c-d} \frac{dU_{III}}{dx} dy + \frac{1}{\rho_1} \int_{c-d}^{c-a} \frac{dU_{III}}{dx} dy$$
 при  $x = b.(4)$ 

Матрица [*Y*] ПЭ рис. 1, *а* в соответствии с теоремой бисекции [4] определяется как

$$[Y] = 2 \begin{bmatrix} Y_1 + Y_2 & Y_1 - Y_2 \\ Y_1 - Y_2 & Y_1 + Y_2 \end{bmatrix}$$

Тогда для входного и выходного сопротивления и ослабления согласованного ПЭ получаем [5]:

$$R_{in} = R_{out} = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{Y_1 Y_2}},$$

$$q = 10 \lg \frac{1 + Y_2 / Y_1 + 2\sqrt{Y_2 / Y_1}}{1 + Y_2 / Y_1 - 2\sqrt{Y_2 / Y_1}} \ \text{дБ.}$$
(5)

В практически важном случае a = d выражения для  $Y_1$  и  $Y_2$  имеют вид

$$Y_{1} = \frac{1}{\rho_{1}} \frac{a}{b} \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} F_{n}(-1)^{n} \frac{\operatorname{th}(\alpha_{n}a)}{\alpha_{n}a} \right],$$
$$Y_{2} = \frac{1}{\rho_{2}} \frac{1}{\frac{c}{b} \left(1 - \frac{a}{c}\right) \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} D_{n}(-1)^{n} \frac{\operatorname{th}[\alpha_{n}(c-a)]}{\alpha_{n}(c-a)} \right\}}.$$
(6)

Коэффициенты  $F_n$ ,  $D_n$  находятся из следующих систем уравнений, решаемых методом редукции [6]:

$$\sum_{\substack{n, k=1 \\ n, k=1}}^{\infty} \frac{F_n(-1)^{n+1}}{1 - \left(\frac{2n}{2k+1}\right)^2} \times \left\{ 1 + \frac{\alpha_n}{\Omega\beta_k} \text{th}[\beta_k(c-a)] \text{th}(\alpha_n a) \right\} = 1;$$

$$\sum_{\substack{n, k=1 \\ n, k=1}}^{\infty} \frac{D_n(-1)^{n+1}}{1 - \left(\frac{2n}{2k+1}\right)^2} \times \left\{ 1 + \frac{\alpha_n}{\Omega\beta_k} \text{th}[\alpha_n(c-a)] \text{th}(\beta_k a) \right\} = 1.$$
(7)

Опыт вычислений показывает, что погрешность порядка 1...3 % обеспечивается при редукции систем (7) к 8...10 порядку и удержанию соответствующего числа членов в соотношениях (6).

Отметим, что при a/c = 1/2 в силу тождественности систем (7)  $R_{in} = R_{out} = \rho_1/(2\sqrt{\Omega})$ , что совпадает с известным в литературе результатом [7].

Для коротких ( $c/b \ge 3$ ) ПЭ, учитывая только первые члены в (6), получаем:

$$R_{in} = R_{out} = \frac{\rho_1}{2} \sqrt{\frac{1 - a/c}{a/c}} \frac{1}{\sqrt{\Omega}}, \quad q = \frac{8,68\Omega}{\frac{c}{2b}\sqrt{\frac{a}{c}\left(1 - \frac{a}{c}\right)}},$$

что при  $\Omega = 1$  совпадает с известными результатами [7].

На рис. 2 приведены результаты расчетов ПЭ с кусочно-однородной резистивной пленков (см. рис. 1, a).

Работоспособность методики проверена сравнением с результатами моделирования (расхождение не превышает 2 %) в программном комплексе Elcut 5.1. При этом отмечена неоднородность распределения тока и мощности по поверхности ПЭ. Максимальная плотность тока  $I (мA/m^2)$  наблюдается в области входного контакта и при a/c = 0,5определяется (при  $R_{in} = 50$  Ом) соотношением  $I = 0,014 \exp(1,26\Omega)$ , слабо зависящим от b/a.

### Топология ПЭ сложной формы и его расчет

Более равномерное распределение плотности тока и мощности по подложке ПЭ при тех же значениях  $\Omega$  обеспечивает ПЭ, приведенные на рис. 3, *a*.



Рис. 2. Зависимость ослабления (*a*) и нормированного входного сопротивления (*b*) согласованного поглощающего элемента от *a*/c при  $\Omega = 100$  (*1*); 10 (*2*); 1 (*3*); 0,1 (*4*); 0,01 (*5*); 0,001 (*6*)

Fig. 2. Dependence of attenuation (a) and normalized input resistance (b) co-ordinated AE on a/c at  $\Omega = 100$  (1); 10 (2); 1 (3); 0.1 (4); 0.01 (5); 0.001 (6)



Рис. 3. Поглощающие элементы (a)-(d) сложной формы на основе кусочнооднородных структур

Fig. 3. AE(a)—(d) of a complex form on the basis of the piecewise-homogeneous structures



Рис. 4. Поглощающий элемент рис. 3, c (a) в режиме симметричного (b) и антисимметричного (c) возбуждения

Fig. 4. AE of fig. 3, c (a) in the symmetric (b) and antisymmetric (c) modes of excitation

ПЭ, показанный на рис. 3, *b* (сложенный вдвое ПЭ на рис. 3, *a*), обладает прежним ослаблением *q* и увеличенным вдвое входным сопротивлением. Для получения прежнего  $R_{in}$  надо уменьшить во столько же раз величину  $\Omega$ .

ПЭ, представленный на рис. 3, *c*, с обращенными по отношению к ПЭ на рис. 3, *b* краевыми условиями имеет то же значение *q*, а его входное сопротивление  $R_{inc}$  связано с входным сопротивлением  $R_{inb}$  соотношением  $R_{inc} = 1/R_{inb}$ .

ПЭ, приведенный на рис. 3, d, обладает прежним значением ослабления q, а его входное сопротивление оказывается в два раза меньше входного сопротивления ПЭ на рис. 3, c.

При одинаковых ослаблениях входные сопротивления ПЭ, представленных на рис. 3, d и a, связаны таким же соотношением, как и ПЭ, приведенных на рис. 3, *b* и *c*. Поэтому достаточно провести расчет только ПЭ, приведенного на рис. 3, *c*.

Разместив дополнительные контакты на линиях  $x = \tau$  и  $x = -\tau$  (возникающая при этом погрешность не превышает 1 %, поскольку искажения поля вблизи новых контактов учитываются в значительной степени последующей структурой) приходим к ПЭ, представленным на рис. 1, *a*, с известными дополнительными сопротивлениями на входе и выходе. Находя [*Y*] — матрицу нового ПЭ [5], определяем  $R_{in}$  и *q* по (5).

Строгий расчет ПЭ, приведенного на рис. 3, c, проводится методом разделения переменных (рис. 4).

В режиме симметричного (рис. 4, b) и асимметричного (рис. 4, c) возбуждения получаем для потенциалов в областях I—III:

$$U_{Ic} = 1 - \frac{y}{a - \tau} + \sum_{n=0}^{\infty} E_n \operatorname{sh}(\alpha_n y) \cos(\alpha_n x);$$
  

$$U_{IIc} = \sum_{\substack{n=0\\n=0}}^{\infty} F_n \operatorname{sh}[\mu_n(b + h - x)] \times \cos[\mu_n(a - y)];$$
  

$$U_{IIcc} = \sum_{\substack{n=0\\n=0}}^{\infty} M_n \operatorname{sh}(\beta_n x) \sin[\beta_n(a - y)] + \sum_{\substack{n=0\\n=0}}^{\infty} N_n \operatorname{sh}(\alpha_n(a - y)) \cos(\alpha_n x);$$
  

$$U_{Ia} = 1 - \underline{-y} + \sum_{\substack{n=0\\n=0}}^{\infty} A_n \operatorname{sh}(\alpha_n y) \cos(\alpha_n x);$$

$$U_{IIa} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \operatorname{sh}[\beta_n(b+h-x)] \times \\ \operatorname{cos}(\beta_n(v-a+\tau))]$$

$$U_{IIca} = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \operatorname{ch}[\alpha_n(a-y)] \cos(\alpha_n x) + \sum_{n=0}^{\infty} D_n \operatorname{ch}(\beta_n x) \cos[\beta_n(y-a+\tau)];$$

 $\alpha_m = n\pi/b$ ,  $\beta_m = n\pi/\tau$ ,  $\mu_m = (2n + 1)/(2\tau)$ . Граничные условия имеют вид:

$$U_{I}(x, 0) = 1, \quad U_{II}(b + h, y) = 0,$$
  

$$U_{I}(x, a - \tau) = U_{III}(x, a - \tau), \quad U_{III}(y, b) = U_{II}(y, b),$$
  

$$\frac{dU_{i}}{dx} = 0, \ i = I, \ ..., \ III, \quad \frac{dU_{I}}{dx} = 0 \ \text{при} \ x = b;$$
  

$$\frac{dU_{I}}{dy} = \frac{dU_{III}}{dy} \ \text{при} \ y = a - \tau,$$
  

$$\frac{dU_{III}}{dx} = \Omega \frac{dU_{II}}{dx} \ \text{при} \ x = b, \ \Omega = \rho_{1}/\rho_{2},$$

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, Том 19, № 4, 2017 -

 $\frac{dU_i}{dx} = 0$  — для симметричного и  $U_i(x, a) = 0$  —

асимметричного возбуждения (I = II, III),

$$Y_1 = \frac{1}{\rho_1} \int_0^b \frac{dU_{Ia}}{dy} dx$$
 и  $Y_2 = \frac{1}{\rho_1} \int_0^{ba} \frac{dU_{Ic}}{dy} dx$  при  $y = 0.$ 

Дальнейший расчет проводится аналогично рассмотренному для ПЭ, представленного на рис. 1, *а*. Предложенная методика расчета рассмотренных ПЭ реализована программно и включена в САПР резистивных структур НПО "ЭРКОН", г. Н. Новгород.

### Заключение

Проведен расчет поглощающих элементов на основе кусочно-однородных резистивных структур, обеспечивающих реализацию широкого диапазона ослаблений на подложке заданных размеров. Результаты расчетов использованы при создании образцов тонкопленочных чип-аттенюаторов размерами 1 × 1 × 0,25 мм диапазона 0,5...32 дБ на подложках из нитрида алюминия. Полученные ре-

зультаты представляют интерес для построения малогабаритных СВЧ аттенюаторов широкого диапазона ослаблений.

### Список литературы

1. Львов А. Е., Рудоясова Л. Г., Шишков Г. И., Щербаков В. В. Тонкопленочные полосковые аттенюаторы // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2014. № 5. С. 40—46.

2. Гошин Г. Г., Екимов С. Ю., Семибратов В. П., Фатеев А. В. Анализ и моделирование сверхширокополосных фиксированных аттенюаторов СВЧ-сигналов // Доклады ТУСУР, 2011, № 2 (24). С. 223—226.

3. Садков В. Д., Еремеев Ю. В., Старанчук П. Н. Моделирование многослойного контакта прецизионного чип-резистора // Известия вузов. Электроника. 2014. № 6. С. 14—21.

4. Гиллемин Э. А. Синтез пассивных цепей. М.: Связь, 1970. 720 с.

5. Татур Г. А. Основы теории электрических цепей (справочное пособие): учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1980. 271 с.

6. Фадеев Д. К., Фадеева В. Н. Вычислительные методы линейной алгебры. М.: Физматлит, 1963. 734 с.

7. Ямпурин Н. П., Широков Л. В., Садков В. Д. Современные проблемы радиоэлектроники с позиций теории конформных отображений. Арзамас, АГПИ, 2014. 209 с.

V. D. Sadkov, Ph. D., Associate Professor, sadvd2016@mail.ru, K. S. Fomina, Student, Institute of Radio Engineering and Information Technologies Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. Y. Alekseev, N. Novgorod, 603950, Russian Federation

### Corresponding author:

Sadkov Viktor D., Ph. D., Associate Professor, Institute of Radio Engineering and Information Technologies Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. Y. Alekseev, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: sadvd2016@mail.ru

### Absorptive Elements for Realization of Wide Attenuation Range

Received on January 11, 2017 Accepted on January 18, 2017

Computing of absorptive elements based on piecewise homogeneous resistive structure was conducted using separation of variables. These structures allow realizing by changing the resistance ratio of these resistive films the wide attenuation range in the reference dimension (fraction from dB to 80 dB or more). There are the calculation results reviewed absorbing elements. Reliability of this calculation method was verified simulation in software package Elcut. Investigated distribution of current density in the absorbing elements. The proposed topology provides a more uniform current density distribution and power on the surface of the absorbent member. The results are of interest for the construction of small-size attenuators with microwave band of wide attenuation range.

Keywords: film absorptive elements, resistive attenuators

### For citation:

Sadkov V. D., Fomina K. S. Absorptive Elements for Realization of Wide Attenuation Range, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 238–243.

DOI: 10.17587/nmst.19.238-243

### Introduction

For construction of broadband attenuators the absorbing elements (AE) on the basis of the distributed resistive structures [1] are used.

Realization of small (units and fractions of a decibel) and big (more than 30 dB) attenuations on a substrate of the set sizes confronts problems.

AE of big attenuations simply do not find room on a substrate, and AE of small attenuations with their

small own length have big, depending on attenuation, length of the input/output contacts. The latter bring a hardly controllable contribution to attenuation as a result of the losses in the contacts and the capacitive coupling between them [2, 3].

Topologies were offered and calculation was done of AE based on the piecewise homogeneous resistive structures, which ensured construction of precision smallsized attenuators and chip- attenuators of a wide range of attenuations.

### Topology of a rectangular AE and its calculation

An elementary topology of AE with a piecewise homogeneous resistive film is presented in fig. 1. The demanded range of attenuations is ensured by a variation of the values of the specific surface resistances of films  $\rho_1$ and  $\rho_2$ . Calculation of AE (because of the symmetry it is enough to consider only its half at  $y \ge 0$ ) boils down to solving of the boundary problem for Laplace equation in areas I-III (fig. 1, *a*) by the method of division of the variables under the following boundary conditions:

$$U_{I}(b, y) = U_{1}, \quad U_{I}(-b, y) = U_{2}, \quad U_{III}(x, c) = 0,$$
  

$$U_{I}(x, a) = U_{II}(x, a), \quad U_{II}(x, d) = U_{III}(x, d),$$
  

$$\frac{dU_{I}}{dy} = \frac{dU_{II}}{dy} \text{ at } y = a,$$
  

$$\frac{dU_{II}}{dy} = \Omega \frac{dU_{III}}{dy} \text{ at } y = d,$$
(1)

where  $U_i(x, y)$  — field of potentials in *i* area of AE  $(i = I, II, III); \Omega = \rho_1/\rho_2$  — degree of heterogeneity of a resistive film.

In case of an antisymmetric excitation of AE  $(U_1 = -U_2 = 1)$  on line  $\partial M_4$  U = 0 and for the field of potentials of the structure of fig. 1, *b* we get:

$$U_{I} = \frac{x}{b} + \sum_{n=0}^{\infty} A_{n} \operatorname{ch}(\alpha_{n} y) \sin(\alpha_{n} x);$$
$$U_{II} = \sum_{n=0}^{\infty} B_{n} \operatorname{ch}[\beta_{n}(y-a)] + \operatorname{ch}[\beta_{n}(d-y)] \operatorname{sin}(\beta_{n} x); (2)$$
$$U_{III} = \sum_{n=0}^{\infty} C_{n} \operatorname{sh}(\beta_{n}(c-y)) \operatorname{sin}(\beta_{n} x);$$
$$\alpha_{m} = n\pi/b, \quad \beta_{n} = \pi(2n+1)/(2b).$$

For determination of coefficients  $A_n$ ,  $B_n$ ,  $C_n$  we will use the following conditions (1).

Conductivity  $Y_1$  of the structure of fig. 1, *b*, numerically equal to the force of the current between contacts  $0M_4M_3$  and  $M_1M_2$ , we find in the following way:

$$Y_{1} = \frac{1}{\rho_{1}} \int_{0}^{a} \frac{dU_{I}}{dx} dy \text{ at } x = b.$$
 (3)

In case of a symmetric excitation ( $U_1 = U_2 = 1$ ) on line  $\partial M_4 dU/dx = 0$  (structure of fig. 1, c). Conductivity  $Y_2$  of this structure is convenient to express through conductivity of the structure of fig. 1, d with the inverse boundary conditions:

$$Y_2 = \frac{1}{\rho_1} \int_0^{c-d} \frac{dU_{III}}{dx} dy + \frac{1}{\rho_1} \int_{c-d}^{c-a} \frac{dU_{III}}{dx} dy$$
 при  $x = b.(4)$ 

Matrix [Y] of AE of fig. 1, *a* in accordance with the bisector theorem [4] is defined as

$$[Y] = 2 \begin{bmatrix} Y_1 + Y_2 & Y_1 - Y_2 \\ Y_1 - Y_2 & Y_1 + Y_2 \end{bmatrix}$$

Then for the input and output resistances and attenuation of the coordinated AE [5]:

$$R_{in} = R_{out} = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{Y_1 Y_2}},$$

$$q = 10 \lg \frac{1 + Y_2 / Y_1 + 2\sqrt{Y_2 / Y_1}}{1 + Y_2 / Y_1 - 2\sqrt{Y_2 / Y_1}} \, \mathrm{dB}.$$
(5)

In practically important case a = d the expressions for  $Y_1$  and  $Y_2$  look like the following:

$$Y_{1} = \frac{1}{\rho_{1}} \frac{a}{b} \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} F_{n}(-1)^{n} \frac{\operatorname{th}(\alpha_{n}a)}{\alpha_{n}a} \right],$$
$$Y_{2} = \frac{1}{\rho_{2}} \frac{1}{\frac{c}{b} \left(1 - \frac{a}{c}\right) \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} D_{n}(-1)^{n} \frac{\operatorname{th}[\alpha_{n}(c-a)]}{\alpha_{n}(c-a)} \right\}}.$$
(6)

Coefficients  $F_n$ ,  $D_n$  are found from the following systems of equations solved by the method of reduction [6]:

$$\sum_{n, k=1}^{\infty} \frac{F_n(-1)^{n+1}}{1 - \left(\frac{2n}{2k+1}\right)^2} \times \left\{ 1 + \frac{\alpha_n}{\Omega\beta_k} \text{th}[\beta_k(c-a)] \text{th}(\alpha_n a) \right\} = 1;$$

$$\sum_{n, k=1}^{\infty} \frac{D_n(-1)^{n+1}}{1 - \left(\frac{2n}{2k+1}\right)^2} \times \left\{ 1 + \frac{\alpha_n}{\Omega\beta_k} \text{th}[\alpha_n(c-a)] \text{th}(\beta_k a) \right\} = 1.$$
(7)

Experience of calculations shows, that an error of about 1...3 % is ensured at the reduction of the systems (7) to 8...10 order and retention of the corresponding number of members in the correlations (6).

We should point out that at a/c = 1/2 due to the identity of the systems (7)  $R_{in} = R_{out} = \rho_1/(2\sqrt{\Omega})$ , which coincides with the known result [7].

For short  $(c/b \ge 3)$  AE, taking into account only the first members in (6) we get:

$$R_{in} = R_{out} = \frac{\rho_1}{2} \sqrt{\frac{1-a/c}{a/c}} \frac{1}{\sqrt{\Omega}}, \quad q = \frac{8,68\Omega}{\frac{c}{2b}\sqrt{\frac{a}{c}\left(1-\frac{a}{c}\right)}},$$

which at  $\Omega = 1$  coincides with the results [7].

Fig. 2 presents calculations of AE with the piecewise homogeneous resistive films (see fig. 1, a).

The workability of the technique was verified by comparison with the results of modeling (the divergence did not exceed 2 %) in Elcut 5.1 program complex. At that, the heterogeneity of the distribution of the current and power on the surface of AE was noted.

The maximal density of the current  $I (\text{mA/m}^2)$  was observed in the area of the input contact, and at a/c = 0.5 it was determined (at  $R_{\text{BX}} = 50 \ \Omega$ ) by correlation  $I = 0.014 \exp(1.26 \ \Omega)$ , poorly depending on b/a.

### Topology of AE of a complex form and its calculation

A more uniform distribution of the density of the current and power on the substrate of AE at the same values of  $\Omega$  ensures AE (fig. 3, *a*).

AE presented in fig. 3, *b* (biplicate AE in fig. 3, *a*) possesses the former attenuation *q* and doubled input resistance. For obtaining of the former  $R_{in}$  it is necessary to reduce the value of  $\Omega$  the same number of times.

AE in fig. 3, *c* with the boundary conditions turned to AE (fig. 3, *b*) has the same value of *q*, and its input resistance  $R_{inc}$  is connected with resistance  $R_{inb}$  by correlation  $R_{inc} = 1/R_{inb}$ .

relation  $R_{inc} = 1/R_{inb}$ . AE in fig. 3, *d* possesses the former value of attenuation *q*, and its input resistance appears to be twice as little as the input resistance of AE (fig. 3, *c*).

At identical attenuations the input resistances of AE (fig. 3, d and a) are connected by the same correlation as AE (fig. 3, b and c). Therefore, it is enough to carry out a calculation of only AE (fig. 3, c).

Having placed additional contacts on lines  $x = \tau$  and  $x = -\tau$  (at that, a possible error does not exceed 1 % because distortions of the field near new contacts are taken into account substantially by the subsequent structure) we come to AE of fig. 1, *a* with the known additional resistances at the input and output. By finding [Y] — matrix of new AE [5], we determine  $R_{in}$  and q by (5).

Strict calculation of AE (fig. 3, c) is done by the method of division of the variables (fig. 4).

In the modes of the symmetric (fig. 4, b) and asymmetric (fig. 4, c) excitations we get the following for the potentials in areas I-III:

$$U_{Ic} = 1 - \frac{y}{a - \tau} + \sum_{n=0}^{\infty} E_n \operatorname{sh}(\alpha_n y) \cos(\alpha_n x);$$
  

$$U_{IIc} = \sum_{n=0}^{\infty} F_n \operatorname{sh}[\mu_n(b + h - x)] \cos[\mu_n(a - y)];$$
  

$$U_{IIcc} = \sum_{n=0}^{\infty} M_n \operatorname{sh}(\beta_n x) \sin[\beta_n(a - y)] + + \sum_{n=0}^{\infty} N_n \operatorname{sh}(\alpha_n(a - y)] \cos(\alpha_n x);$$
  

$$U_{Ia} = 1 - \frac{y}{a - \tau} + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \operatorname{sh}(\alpha_n y) \cos(\alpha_n x);$$
  

$$U_{IIa} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \operatorname{sh}[\beta_n(b + h - x)] \cos(\beta_n(y - a + \tau)];$$
  

$$U_{IIca} = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \operatorname{ch}[\alpha_n()a - y)] \cos(\alpha_n x) + + \sum_{n=0}^{\infty} D_n \operatorname{ch}(\beta_n x) \cos[\beta_n(y - a + \tau)];$$
  

$$\alpha_m = n\pi/b, \quad \beta_m = n\pi/\tau, \quad \mu_m = (2n + 1)/(2\tau).$$

The boundary conditions look like the following:

$$U_{I}(x, 0) = 1, \quad U_{II}(b + h, y) = 0,$$
  
$$U_{I}(x, a - \tau) = U_{III}(x, a - \tau), \quad U_{III}(y, b) = U_{II}(y, b),$$

$$\frac{dU_i}{dx} = 0, i = I, ..., III, \quad \frac{dU_I}{dx} = 0 \text{ at } x = b;$$
$$\frac{dU_I}{dy} = \frac{dU_{III}}{dy} \text{ at } y = a - \tau,$$
$$\frac{dU_{III}}{dx} = \Omega \frac{dU_{II}}{dx} \text{ at } x = b, \Omega = \rho_1/\rho_2,$$

 $\frac{dU_i}{dx} = 0 - \text{ for the symmetric and } U_i(x, a) = 0 - \text{ asymmetric excitations } (I = II, III);$ 

$$Y_1 = \frac{1}{\rho_1} \int_0^b \frac{dU_{Ia}}{dy} dx$$
 and  $Y_2 = \frac{1}{\rho_1} \int_0^{ba} \frac{dU_{Ic}}{dy} dx$  at  $y = 0$ .

The further calculation is done similarly to the one considered for AE of fig. 1, *a*. The proposed calculation method of the considered AE is realized in programs and included in CAD of the resistive structures of ERKON Co., Nizhny Novgorod.

### Conclusion

Calculation of AE was carried out on the basis of the piecewise homogeneous resistive structures ensuring realization of a wide range of attenuations on a substrate of the set sizes. The results are used for development of samples of the thin-film chip-attenuators with the sizes of  $1 \times 1 \times 0.25$  mm, the range of 0.5...32 dB on the substrates from aluminum nitride. They are of interest for construction of small-sized microwave attenuators of a wide range of attenuations.

#### References

1. L'vov A. E., Rudojasova L. G., Shishkov G. I., Shherbakov V. V. Tonkoplenochnye poloskovye attenjuatory, *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva*, 2014, no. 5, pp. 40–46 (in Russian).

2. Goshin G. G., Ehimov S. Ju., Semibratov V. P., Fateev A. V. Analiz i modelirovanie sverhshirokopolosnyh fiksirovannyh attenjuatorov SVCh-signalov, *Doklady TUSUR*, 2011, no. 2, pp. 223–226 (in Russian).

3. Sadkov V. D., Eremeev Ju. V., Staranchuk P. N. Modelirovanie mnogoslojnogo kontakta precizionnogo chip-rezistora, *Izvestija vuzov. Jelektronika*, 2014, no. 6, pp. 14–21 (in Russian).

4. Gillemin Je. A. Sintez passivnyh cepej, Moscow, Svjaz', 1970. 720 p. (in Russian).

5. **Tatur G. A.** *Osnovy teorii jelektricheskih cepej (spravochnoe posobie)*: Uchebnoe posobie, Moscow, Vysshaja shkola, 1980. 271 p. (in Russian).

6. Fadeev D. K., Fadeeva V. N. Vychislitel'nye metody linejnoj algebry, Moscow, Fizmatlit, 1963. 734 p. (in Russian).

7. Jampurin N. P., Shirokov L. V., Sadkov V. D. Sovremennye problemy radiojelektroniki s pozicij teorii konformnyh otobrazhenij, Arzamas, AGPI, 2014. 209 p. (in Russian).

# Применение MHCT *Application of* MNST

УДК 621.38

DOI: 10.17587/nmst.19.244-256

В. К. Смолин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: niiis@niiis.nnov.ru, ФГУП "ФНПЦ НИИ измерительных систем им. Ю. Е. Седакова", Н. Новгород

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПЕРВИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

### Поступила в редакцию 06.07.2016

Современные источники электропитания являются составной частью радиоэлектронной аппаратуры народохозяйственного, военного и космического назначения. В рамках данной работы выполнен обзор принципов создания малогабаритных возобновляемых первичных источников. Рассматриваются вопросы применения эффективных материалов электронной техники, в том числе и наноструктурированных, в качестве основы функциональных структур источников, технологии формирования и модификации элементов, методов стабилизации характеристик устройств, снижения потерь энергии при преобразовании.

**Ключевые слова:** источник электропитания, фотопреобразователь, термопреобразователь, топливный элемент, радиоизотопный элемент, аккумулятор, наноструктура

### Введение

Проблема обеспечения отраслей отечественной промышленности, где создается и применяется современная РЭА, современными источниками электропитания является частью задачи обеспечения экономической безопасности страны в целом [1].

Наиболее востребованными в различных сферах человеческой деятельности являются возобновляемые источники энергии. Поскольку технический прогресс неразрывно связан с развитием интегральных микро- и нанотехнологий, при создании первичных источников электропитания оправданным является использование достаточно развитых физико-химических процессов технологии производства изделий интегральной электроники, протекающими либо с существенным изменением геометрии твердой фазы, либо только с изменением состава, свойств и структуры внутренних областей, без существенного изменения геометрических размеров [2].

Особенностью нынешнего этапа развития нанотехнологии является то, что он представляет собой процесс, в котором новые способы оперирования материей или объекты предоставляют новые возможности реализации проверенным временем технологиям и обеспечивают лучшие решения. Сегодня нанотехнология представляет собой самую динамичную отрасль науки и техники [3].

В данной публикации рассматриваются варианты создания возобновляемых (кроме преобразователей механической энергии в электрическую) и гибридных первичных источников электропитания с использованием достижений микро- и нанотехнологий.

### Фотоэлектрические преобразователи

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) являются основным элементом солнечных батарей. Для отражения развития технологии их изготовления иногда пользуются понятием "поколение фотопреобразователей".

Первое поколение фотопреобразователей — это классические кремниевые элементы с традиционным *p*—*n*-переходом. Как правило, это пластины из чистого монокристаллического или поликристаллического кремния толщиной 200...300 мкм. Они характеризуются высоким КПД (17...22 %) и высокой себестоимостью.

Второе поколение фотопреобразователей также основывается на использовании p—n-перехода, однако не использует кристаллический кремний как основной материал. Обычно применяются следующие материалы: теллур, кадмий (CdTe), смесь меди, индия, галлия, селен (CIGS) и аморфный кремний. Как правило, толщина поглощающего свет слоя полупроводника составляет всего от 1 до 3 мкм. Процесс производства таких фотоэлементов более автоматизирован и имеет значительно меньшую себестоимость. Основным недостатком второго поколения элементов является меньшая эф-

фективность, чем у элементов первого поколения, которая колеблется в зависимости от технологии в диапазоне 7...15 %. В настоящее время рыночная доля второго поколения около 18 %.

Третье поколение фотопреобразователей также относится к тонкопленочным технологиям. Они лишены привычного понятия *p*—*n*-перехода, следовательно, и использования полупроводников. Основным направлением в развитии является создание фотопреобразователей на основе органических полимерных материалов. Преимуществом элементов третьего поколения является низкая себестоимость и простота изготовления, а недостатком — низкая эффективность, которая не превышает 7 %. В настоящее время рыночная доля третьего поколения элементов третьего поколения является но поколения элементов не превышает 0,5 % [4—7].

Разработка и совершенствование  $\Phi \Im \Pi$  в целях уменьшения потерь энергии проводится в следующих направлениях [8—10]:

- использование полупроводников с оптимальной для солнечного излучения шириной запрещенной зоны;
- направленное улучшение свойств полупроводниковой структуры путем ее оптимального легирования и создания встроенных электрических полей;
- переход от гомогенных к гетерогенным и варизонным полупроводниковым структурам;
- оптимизация конструктивных параметров ФЭΠ (глубины залегания *p*—*n*-перехода, толщины базового слоя, частоты контактной сетки и др.);
- применение многофункциональных оптических покрытий, обеспечивающих просветление, терморегулирование и защиту ФЭП от космической радиации;
- разработка ФЭП, прозрачных в длинноволновой области солнечного спектра за краем основной полосы поглощения;
- создание каскадных ФЭП из специально подобранных по ширине запрещенной зоны полупроводников, позволяющих преобразовывать в каждом каскаде излучение, прошедшее через предыдущий каскад.

Следует отметить, что максимальная эффективность в настоящее время достигнута для солнечных батарей на основе структуры GaInP/GaAs/Ge (коэффициент фотоэлектрического преобразования 32,0 %) [11].

Концентрирование солнечного излучения является очень эффективным способом повышения КПД солнечных элементов. При оценке предельной эффективности многопереходных элементов, состоящих из нескольких десятков каскадов, предельный КПД составляет почти 87 %. В условиях космоса в качестве концентраторов излучения наиболее перспективно применение линейных линз Френеля [12]. Используя углеродные нанотрубки, объединенными в так называемые "солнечные воронки", ученым фирмы MIT-research удалось сконцентрировать в 100 раз больше солнечной энергии, чем обычный фотоэлемент [13].

Другое применение достижений наноэлектроники — применение структур из нанопроволочек кремния — позволило получить более высокое поглощение излучения в высокочастотной области видимого спектра, чем тонкая пленка, благодаря одновременному действию двух факторов: низкой отражательной способности и нулевому пропусканию [14].

Повышение КПД солнечных батарей может быть достигнуто также при использовании гетероэлектриков — материалов, в которых спектр солнечного излучения преобразуется в излучение одной частоты, что повышает эффективность преобразования света в электричество. У гетероэлектрического фотоэлемента эффективность преобразования видимого спектра в электроэнергию — 54 %, инфракрасного излучения в электроэнергию — 31 %, что значительно превышает существующие мировые показатели (около 42 %); кроме того, фотоэлемент имеет массу полупроводникового вещества на 1 Вт энергии в 1000 раз меньше, чем у известных аналогов [15].

### Термоэлектрические преобразователи

Среди преимуществ термоэлектрического преобразования для многих областей применения можно назвать отсутствие движущихся частей и, как следствие, отсутствие вибраций, трений, износа, а также необходимости использовать жидкости или газы под высоким давлением. Объемные термоэлектрические преобразователи успешно конкурируют с тонкопленочными по большинству параметров — по миниатюрности, холодильным параметрам и динамическим характеристикам [4—7, 16—28].

Расширение возможностей термоэлектричества основано на использовании новых материалов — на квантовых ямах, скуттерудитов, функциональных градиентных материалов и др. Ведутся исследования по созданию тонкопленочных устройств в диапазоне мощностей от нВт до десятков мкВт с высоким напряжением (до 5В); удельная плотность мощности остается при этом на уровне  $60...90 \text{ мкВт/см}^3$ . В качестве основы термоэлементов используются кремниевые композиции, теллурид висмута, сложные полупроводники (например,  $Bi_2Te_3/Bi_2 - xSb_xTe_3$ ).

Разработки тонкопленочных микроустройств рассмотрены в работах [17—24]. На рис. 1 представлена схема термоэлектрического микрогенератора, выполненного с использованием тонкопле-



Рис. 1. Схема термоэлектрического микрогенератора на кремниевой основе: 1 — нагреватель; 2 — кремниевая рама; 3 — термоэлементы; 4 — межэлементные соединения

Fig. 1. Silicon-based thermoelectric microgenerator: 1 - heater; 2 - silicon frame; 3 - thermoelements; 4 - inter-element connections

ночных технологий на основе кремниевого мелкодисперсного поликристаллического материала.

Устройство может работать и как радиоизотопный микрогенератор, и как устройство, в котором роль нагревателя выполняет поверхность человеческого тела, а хладагентом является воздух. Подобные термоэлементы могут работать при перепаде температур 5...10 К.

### Радиоизотопные элементы

Радиоизотопные источники электрической энергии могут осуществить прорыв в микроэлектронике в случае применения их в микроэлектромеханических системах (МЭМС) и нанотехнологиях. Отпадет необходимость в использовании проводов и трансформаторов для нового поколения микроприборов. Радиоизотопные источники обладают более высокой выходной плотностью мощности, чем химические батареи, не зависят от условий окружающей среды и могут работать в большом диапазоне температур и давления, автономны и не нуждаются в перезарядке.

Преобразователи ионизирующего излучения можно разделить на две группы: термические и нетермические. В термических преобразователях электричество генерируется за счет разницы температур. В качестве источника теплоты в них используются радиоизотопы, а в качестве материала термоэлектрических элементов — в основном теллурид висмута, кремний, германий (температура горячего спая в преобразователях может достигать 270 °C). Эффективность преобразования таких источников энергии составляет около 5 % [29—32].

Нетермические радиоизотопные источники используют энергию падающего излучения. В них осуществляется либо прямое преобразование, когда электронно-дырочные пары генерируются при пролете частицы через бетавольтаическую батарею, или косвенное преобразование. При косвенном преобразовании энергия радиоактивного распада (альфа- или бета-частицы) сначала преобразуется в видимый или легкий ультрафиолетовый спектр излучения при использовании люминесцентных материалов, а затем свет преобразуется в электричество фотогальваническими преобразователями.

В качестве материалов преобразователей в бетавольтаических батареях используют традиционные полупроводники. В [33] рассмотрен источник питания, состоящий из герметичного корпуса, заполненного тритием, в среде которого размещен преобразователь бета-излучения в электрический ток, изготовленный из арсенида галлия. В течение времени полураспада трития арсенид-галлиевый детектор бета-частиц сохраняет способность эффективного преобразования энергии бета-излучения в электрический ток. Это в 4 раза больший срок службы, чем при использовании кремниевого преобразователя.

Для увеличения эффективности сбора и преобразования энергии бета-распада используется структура с развитой поверхностью. Оценка эффективности бета-преобразователей на основе микроканального кремния показывает, что при оптимальных значениях ширины микроканала (3 мкм) и расстояния между каналами (10...12 мкм) плотность тока генерации может достигать 1600 нА/см<sup>2</sup>. Конструкция с трехмерным диодом на пористом кремнии позволила увеличить КПД в десять раз по сравнению с плоской конструкцией [34].

В ГНЦ РФ ТРИНИТИ (г. Троицк, Московская обл.) разработаны физические принципы создания стационарных электрических генераторов на основе долгоживущих радиоактивных изотопов. Энергия радиоактивного распада сначала преобразуется в ультрафиолетовое излучение в результате процессов ядерно-стимулированной флуоресценции в специально подобранном газе, например в ксеноне, а затем энергия УФ фотонов превращается в электрическую энергию с помощью радиационно стойкого алмазного преобразователя. Эффективность преобразования энергии радиоактивного распада в ультрафиолетовое излучение в эксимерных средах может достигать 50 %, а эффективность преобразования энергии ультрафиолетового излучения в электрическую — 70 %; это обеспечивает КПД разработанного генератора в 3...5 раз выше КПД существующих систем с использованием теплового цикла или солнечных батарей [35].

### Микротопливные элементы

Микротопливный элемент (электрохимический генератор) — химический источник тока, состоящий из батареи топливных элементов, а также систем хранения и подачи реагентов, отвода продуктов реакции, контроля и управления [36]. Схематическое изображение топливного элемента приведено на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки).

В микротопливной ячейке основным элементом является центральная мембрана, каждая сторона которой покрыта слоем катализатора: один для реакции с топливом, другой — для реакции с кислородом воздуха. Процесс в ячейках метанол воздух представляет собой прямое преобразование энергии топлива на основе метанола в электрическую мощность, где на выходе образуются только два продукта — диоксид углерода и водяной пар [37].

Для производства протонообменных мембран используют фторполимеры с ионизированными боковыми группами на своих цепях, полиуглеводороды и другие нефторированные полимеры. В настоящее время наиболее распространенной мембраной является перфорированная ионообменная мембрана Nafion, разработанная компанией DuPont в 1966 г. Почти все доступные мембраны для топливного элемента являются мембранами Nafion. Материалы на основе таких полимеров высокотехнологичны, и на них удается получать довольно высокие характеристики при рабочих температурах до 90 °C [38].

Объединение разных пористых слоев (двух электродов и мембраны) в единой кремниевой пластине дает возможность получить монолитный мембранно-электродный блок (МЭБ), а применение методов кремниевой микромеханики позволит создать периферийные устройства, получить монолитный топливный элемент. Перспективность применения кремния обусловлена его многофункциональностью, которая дает возможность формировать газоподводящие каналы (макропоры размером 1...10 мкм и плотностью 10<sup>6</sup>...10<sup>7</sup> см<sup>-2</sup>), электроды с низким удельным сопротивлением, газодиффузионные слои на поверхности каналов, каркас для протонпроводящей мембраны.

Мембраны из перфорированного иономера Nafion плохо сочетаются со стандартными микротехнологиями, а изменение их объема при увлажнении представляет большую проблему, особенно в процессе ее сборки с кремниевыми электродами. Использование мезапористого кремния позволяет изолировать между собой анод и катод в МЭБ. Модификация его поверхности или заполнение мезапор размером в десятки нанометров материалами с ионной проводимостью позволяет получить армированный твердый электролит. В [39] предложена композитная протонпроводящая мембрана, содержащая пористую кремниевую структуру, выполненную из макропористого кремния, поры которой заполнены электролитом на основе поливинилового спирта, этерифицированного фенолсульфокислотами.

Традиционно каталитические слои на протонпроводящую мембрану могут быть нанесены с помощью распыления каталитических чернил (катализатор на углеродном носителе в смеси с жидким "Нафионом"). В последнее время для снижения расхода драгметаллов и получения ультратонких слоев электрокатализаторов используют вакуумное физическое и химическое осаждение, а также электрохимическое осаждение катализаторов, которое резко уменьшает стоимость изделий и повышает коэффициент использования катализатора. С помощью вакуумного физического осаждения можно создавать тонкие и сложные по форме каталитические слои непосредственно на поверхности мембраны. Экспериментально определено, что наночастицы платины являются в 4 раза более активными катализаторами, чем крупные частицы [40—42].

В настоящее время создаются безмембранные топливные элементы, в которых топливо и окислитель сливаются в виде струи жидкости в микроканале. В таких элементах могут быть использованы стандартные технологии изготовления микросхем, исключены относительно сложные помповые насосы [43, 45], а удельная мощность "сжигания" топлива может достигать 385 Вт/л.

### Аккумуляторы

Технологии изготовления аккумуляторов непрерывно развиваются, и на смену традиционно используемым никель-кадмиевым и никель-металлгидридным батареям пришли литий-ионные, обладающие высокими эксплуатационными характеристиками (например, самыми высокими уровнями удельной емкости и плотности разрядного тока) [46].

Повышение емкости малогабаритных аккумуляторных батарей может быть получено за счет использования электродов на основе гомогенного спрессованного раствора электропроводного компонента и активного материала, способного поглощать и выделять литий в присутствии электролита; при этом пористость спрессованных электродов составляет от 25 до 90 %. Активный материал имеет структуру полых сфер с толщиной стенки до 10 мкм или структуру агрегатов или агломератов с максимальным размером 30 мкм, при этом сепаратор, разделяющий два объемных электрода, содержит высокопористый электроизоляционный керамический материал с открытыми порами и пористостью от 30 до 95 % [47].

Во всех литий-ионных аккумуляторах, доведенных до коммерциализации, отрицательный электрод изготавливается из углеродных материалов. Изучаются структуры на основе олова, серебра и их сплавов, сульфиды олова, фосфориды кобальта, композиты углерода с наночастицами кремния [48].

Повышенная по сравнению с традиционным графитом удельная емкость кремния при внедре-

нии лития позволяет использовать его в качестве активного материала отрицательного электрода в литий-ионных аккумуляторах, работающих при пониженной температуре, вплоть до -40 °C.

Кремниевый анод в литий-ионных элементах питания имеет два ключевых недостатка. Первый низкая кулоновская эффективность, т. е. заряд, передаваемый через кремниевый электрод, испытывает значительные потери. Второй, и более значимый, состоит в том, что при каждом цикле зарядки кремниевый материал сжимается и расширяется до 300 %. Это приводит к образованию трещин, уменьшающих производительность батареи, создает короткие замыкания и в конечном итоге разрушает элемент питания.

Существенно, что электроды на основе нанокремния работоспособны в контакте с электролитом на основе пропиленкарбоната, в отличие от графитовых электродов. Для увеличения удельной емкости и повышения кулоновской эффективности отрицательных электродов в процессах заряда и разряда в литий-ионных аккумуляторах предложен тонкопленочный материал анода, сформированный из наноразмерных кластеров кремния в оболочке из двуокиси кремния. Пленки получают в плазме магнетронного разряда, содержащей 1...3 % кислорода по объему в аргоне. Содержание двуокиси кремния в пленке находится в пределах 16...41 масс. %, а наноструктурированный кремний в оболочке двуокиси кремния имеет кластерную структуру с размерами кластеров 5...15 нм [49].

Анод на основе кремниевых нанотрубок с двойными стенками обладает повышенной прочностью. Нанотрубки покрыты тонким слоем оксида кремния, который является достаточно прочным, чтобы мешать их расширению. Такой анод может выдержать 6000 циклов заряда/разряда без значительных повреждений. Благодаря этому аноду емкость литий-ионных батарей теоретически можно поднять в 10 раз [50, 51].

В [52] представлен кремниевый электрод для батареи, содержащий кремниевую подложку или структуру "кремний-на-диэлектрике" с закрепленным на ней массивом субмикронных кремниевых стержней, покрывающем не более 0,5 площади поверхности. Размер стержней составляет 0,1...1,0 мкм в диаметре и 1...10 мкм в высоту. При изготовлении массива стержней используется изолирующая (островковая) литография, для чего на подложку вакуумным осаждением наносят пленку хлорида цезия, растворяют ее в воде с образованием на поверхности подложки полусферических изолированных участков, а затем проводят ионно-лучевое травление через маску хлорида цезия.

Подтверждена возможность создания микроскопических литиево-ионных аккумуляторов, в том числе распечатанных с помощью 3D-принтера [53].

### Гибридные источники электропитания

К гибридным малогабаритным источникам электропитания, по мнению автора, следует условно отнести устройства:

 реализующие способы преобразования различных видов энергии в электрическую, которые отличаются по совокупности, порядку и условиям событий от работы традиционно классифицируемых источников;

— включающие в себя собственно генераторы электрической энергии и ее накопители.

Разработанные технологии "energy chip" позволяют создать термоэлектрические генераторы, в которых камера сгорания топлива отделена от источника электроэнергии. Это позволит использовать любой вид теплоты для получения электрической энергии, в том числе природные источники теплоты и атомную энергию. Также можно использовать любой вид углеводородных топлив в наиболее оптимальном режиме каталитического горения, что резко уменьшает загрязнение окружающей среды [43].

В работе [54] описан термогенератор на основе каталитического сгорания на мембране. Устройство имеет канал для входа газовоздушной смеси, вытравленный в кремниевой пластине, покрытый тонкой мембраной из нитрида кремния, и высокотемпературную батарею на основе Si—Ge. Генератор стабильно работает при сгорании водорода, аммиака или бутана при температуре до 500 °C; выходное напряжение составляет около 7 В, мощность — 75 мВт.

Разработан "спиновый аккумулятор" (spin battery), который "заряжается" при воздействии сильного магнитного поля на наномагниты в туннельных магниторезистивных элементах (MTJ), т. е. позволяющий преобразовывать энергию в электрическую без промежуточных химических реакций. Структура этого аккумулятора, использующая в качестве функциональных материалов полупроводниковые соединения группы A<sub>3</sub>B<sub>5</sub>, приведена на рис. 3 [55] (см. четвертую сторону обложки).

Японские инженеры создали полупрозрачный литий-ионный аккумулятор с тонкопленочными электродами толщиной 80...90 нм. Аккумуляторы заряжаются от солнечного света или другого яркого источника освещения. В отсутствие солнечного света материал довольно хорошо пропускает свет: так, на волне 550 нм, соответствующей зеленому свету, прозрачность разряженного аккумулятора составляет около 60 %. В присутствии солнечного света аккумулятор начинает накапливать заряд, увеличивается плотность лития на электродах и изменяется валентность материала, так что уровень прозрачности снижается до 30 %. Основным компонентом электролита для положительного электрода был  $Li_3Fe_2(PO_4)_3$  (LFP), а для отрицательного электрода —  $Li_4Ti_5O_{12}$  (LTO) и  $LiPF_6$  (гексафтор-фосфат лития) [56].

К усторойствам второго типа относятся прежде всего ионисторы (суперконденсаторы, двухслойные электрохимические конденсаторы), функционально представляющие собой гибрид конденсатора и химического источника тока. Основная область применения — источники резервного питания [57].

Преимущества суперконденсаторов заключаются в высокой скорости зарядки и разрядки (конденсаторы заряжаются примерно в 100...1000 раз быстрее аккумуляторов), простоте зарядного устройства, долговечности, в компактности по сравнению с электролитическими конденсаторами подобной емкости, низкой токсичности материалов. Применение наноструктурированных материалов позволяет увеличить емкость и срок службы. При использовании технологии капиллярного сжатия гелеобразных графеновых пленок в присутствии жидкого электролита можно создавать графеновые листы с высокой плотностью и четкой прослойкой субнанометрового уровня между листами. При этом жидкий электролит играет двойную роль: сохраняет минимальный зазор между листами графена и проводит электричество. Удалось создать суперконденсатор с плотностью хранения энергии 60 Вт · ч/л [58].

В качестве принципиально новой основы для солнечного "аккумулятора" предложено использовать системы, состоящие из углеродных нанотрубок, модифицированных с помощью азобензола [59]. Принцип действия этого устройства заключается в сохранении тепловой энергии солнца за счет химических связей фотопереключаемых молекул. При поглощении солнечной энергии молекулы переходят из одного состояния в другое, при этом изменяется только геометрия самих молекул, а химических реакций не происходит; разница энергий всех молекул вещества в указанных состояниях является тем количеством энергии, которое может быть запасено подобным "аккумулятором". В данном случае нанотрубки используются для того, чтобы обеспечить взаимодействие между двумя молекулами азобензола. После выделения накопленной энергии в виде теплоты вещество может "перезаряжаться" с помощью солнечного света; при этом в случае с "идеальным аккумулятором" цикл может повторяться до бесконечности, без потери производительности.

### Заключение

Индустрия малогабаритных источников электропитания представляет довольно наукоемкий сектор современного промышленного производства. Появление интегральных микротехнологий

стало возможным благодаря разработке ряда базовых технологических процессов: осаждения материалов, перераспределения атомов вещества и их размерной обработки. Переход от микротехнологий к нанотехнологиям сопровождается вовлечением в сферу активного применения как традиционных материалов (например, кремния в различных структурных состояниях), так и новых сложных полупроводниковых структур и наноструктурных композиций. С уменьшением размеров элементов происходит также смещение применяемых способов обработки в область прецизионных высокоэнергетических технологий (ионная имплантация, плазмохимическое травление), создается оборудование для их реализации и соответствующая научно-производственная база.

#### Список литературы

1. Рыбак А. Л. Мощь и благосостояние российского государства в сфере производства источников электропитания // Электроника: НТБ. 2000. № 3. С. 12–14.

2. Чистяков Ю. Д., Райнова Ю. П. Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий: учеб. пособие для вузов. Т. 1. М.: Изд-во БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. 392 с.

3. Глазьев С. Ю., Дементьев В. Е., Елкин С. В., Крянев А. В., Ростовский Н. С., Фирстов Ю. П., Харитонов В. В. Нанотехнологии как ключевой фактор нового технологического уклада в экономике / Под ред. акад. РАН С. Ю. Глазьева и проф. В. В. Харитонова. М.: Тровант. 2009. 304 с.

4. URL: http://solarsoul.net/tag/

5. **Hamakawa Y.** (Ed.). Thin-Film Solar Cells. Next generation photovoltaics and its application. Springer. Photonics. UK. 15.10.2009.

6. Lianwei Wang, Jinchuan You, Jing Shi, Bobo Peng, and Paul K. Chu. Improving solar-cell efficiency // Newsroom. Hong Kong, China. 2008.

7. Allen Barnett, Douglas Kirtpatirick, Christiana Honscherg, Duncan Moore, Mark Wanlass, Keith Emery. Very high efficiency solar cell modules // Progress in photovoltaics research and applications. Wiley InterScience. 01.10.2008.

8. Солнечные батареи. URL: http://www.membrana.ru/ particles/tag/177

9. Солнечные батареи. URL: http://works.doklad.ru/ download/UVrw2u7iGWU.zip

10. **Солнечные** батареи на крыше Вашего дома. URL: http:// g-global-expo.org/index.php/ru/component/content/article/65solnechnaya-energetika/570-tonkoplenochnye-solnechnye-batarei

11. Гарифулина М. Р., Власов А. И., Макарчук В. В., Адамовик Н. Модель элемента солнечной батареи типа CIGS // Электронный научно-технический журнал "Инженерный вестник". 2012. № 8. С. 1—21.

12. Алферов Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38, вып. 8. С. 937—945.

13. Форум Альтернативная энергетика. URL: http:// alternativenergy.ru/forum/

14. **Silicon** Thin Film Solar Cells. URL: http://spie.org/ x26848.xml

15. Фельдблюм В. Ш. "Нано" на стыке наук: нанообъекты, нанотехнологии, нанобудущее // Электронное междисциплинарное издание, Ярославль. 2013. 268 с. 16. **Громов Г.** Объемные или тонкопленочные термоэлектрические модули // Компоненты и технологии. 2014. № 8. С. 108—113.

17. Lim J. R., Snyder G. J., Huang C.-K. et al. Thermoelectric microdevice fabrication process and evaluation of the jet propulsion laboratory (JRL) // Proc. of the 21<sup>st</sup> Int. Conf. on Thermoelectrics. IEEE – Long Beach, California, USA. 2002. 535 p.

18. Jacgnot A., Lin W. L., Chen G. et al. Fabrication and modeling of in-plane thermoelectric micro-generator // Proc. of the  $21^{st}$  Int. Conf. on Thermoelectrics, IEEE – Long Beach, California, USA. 2002. 561 p.

19. Bottner H., Nurnus J., Gavricov F., Kuhner G. New thermoelectric components using microsistem technologies // J. of Microtlectromechanical Systems. 2004. Vol. 13, N. 3. P. 414–420.

20. **Bottner H.** Micropelt miniaturized thermoelectric devises: small size? high cooling power densities, short response time // Proc. of the 24<sup>st</sup> Int. Conf. on Thermoelectrics. Clemson, USA. 2005. P. 1–5.

21. Тонкопленочная наноструктура термоэлектрического генератора TEG собирает и перерабатывает рассеиваемое тепло в электричество. URL: http:// www.globalsmt.net www.nextreme.com

22. Грошев И., Полухин И. Сульфид самария и новейшие разработки на его основе // Компоненты и технологии. 2014. № 8. С. 150—157.

23. Тонкопленочный генератор для прямого преобразования тепла в электричество. URL: http://www.russianelectronics.ru/leader-r/

24. **Термоэлектрические** генераторы. URL: http:// www.poweredbythermolife.com

25. Голдсмид Г. Применение термоэлектричества. М.: Физматлит, 1963. 320 с.

26. Rowe D. M. CRC handbook of thermoelectrics. Lon-

don—N. Y. Washington: CRC Press, Boca Raton, 1995. 701 р. 27. Поздняков Б. С., Коптелов Е. А. Термоэлектрическая энергетика. М.: Атомиздат, 1974. 264 с.

28. Гольцман Б. М., Дашевский З. М., Кайданов В. И., Коломоец Н. В. Пленочные термоэлементы: физика и применение. М.: Наука, 1985. 119 с.

29. Платов А. И., Пустовалов А. А., Шаповалов В. П. и др. Малогабаритный, радиоиэотопный источник питания милливаттной мощности для радиоиэотопных электрокардиостимуляторов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Радиационная техника, 1980. Вып. 20. С. 12—16.

30. Пустовалов А. А., Шапошников В. П., Бовин А. В. и др. Радиоизотопные термоэлектрические генераторы для ииплантируемых электрокардиостимуляторов // Атомная энергия. 1986. Т. 60, вып. 2. С. 125—129.

31. Баранов В. Ю., Паль А. Ф., Пустовалов А. А., Старостин А. Н., Суетин Н. В., Филиппов А. В., Фортов В. Е. Радиоизотопные генераторы электрического тока. // Изотопы: свойства, получение, применение. В 2 т. / Под. ред. В. Ю. Баранова. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2005. Т. 2. С. 259—290.

32. Российская ядерная батарейка будет работать 12 лет. URL: www.aethra. ru/news/140.htm

33. Бета-гальваническая батарея. URL: http://www.radioradar.net/print.html? content\_id=3562...

34. Filippov A. V., Pal' A. F., Starostin A. N., Fortov V. E., Petrov O. F., D'yachenko P. P., Rykov V. A. Atomic battery based on ordered dust plasma structures. Ukr. J. Phys. 2005. Vol. 50, N. 2. P. 137–143.

35. Филиппов А. В. Фотовольтаический источник энергии на основе упорядоченных плазменно-пылевых структур. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия А. Прогресс в физике и технике низкотемпературной плазмы. Том I-2. Пылевая плазма / Под ред. В. Е. Фортова, М.: Янус-К, 2006. С. 409—428.

36. Сысоева С. Многообразие микросистемных инноваций: новые технологии и игроки // Компоненты и технологии. 2011. № 9. С. 41—48. 37. Билоненко Р. А. Современное состояние и перспективы развития топливных элементов //Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 6 (103). С. 84—93.

38. Астрова Е. В., Нечитайлов А. А., Забродский А. Г. Кремниевые технологии для микротопливных элементов // International Scientitic Jornal for Alternative Energy and Ecology ISYAEE. 2007. № 2 (46). Р. 60–65.

39. Старков В. В., Писарева А. В., Алдошин С. М., Сангинов Е. А., Лысков Н. В., Добровольский Ю. А., Волков Е. В. Композитная протонпроводящая мембрана и способ ее изготовления. Патент РФ № 2373990, опубл. 27.11.2009.

40. Гринберг В., Скундин А., Нижниковский Е. Современное состояние и тенденции развития микротопливных элементов // Современная электроника. 2012. № 1. С. 10–15.

41. **Гринберг В. А., Скундин А. М.** Микротопливные элементы: современное состояние и перспективы развития (обзор) // Электрохимия. 2010. Т. 46, № 9. С. 1027—1043.

42. Забродский А. Г., Гуревич С. А. Микро- и нанотехнологии для портативных топливных элементов // П-05. Четвертая российская конференция "Физические проблемы водородной энергетики" Санкт-Петербург, 26—28 ноября 2007, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН-С-1-2.

43. **Функциональные** наноматериалы для энергетики. URL: /rudocs.exdat.com/docs/index-95664.html

44. Шленчак С. А. Безмембранные топливные элементы. URL: http:// alternativenergy. ru/tehnologii/ по материалам сайта www.physorg.com/

45. Бакаткин А. Микроскопические топливные элементы для микроэлектроники. URL: http:// physorg.com/

46. Литий-ионные аккумуляторы. URL: http://www. powerinfo.ru/accumulator-liion.php

47. **Прохазка Ж., Прохазка Ж. Жр.** Литиевый аккумулятор и способ его изготовления. Патент РФ № 2519935, опубл. 20.06.2014.

48. Рекорд удельной емкости литий-ионного аккумулятора от Envia Systems. URL: http://enviasystems.com/

49. Бердников А. Е., Кулова Т. Л., Мироненко А. А., Рудый А. С., Гусев В. Н., Метлицкая А. В., Скундин А. М., Геращенко В. Н. Способ изготовления тонкопленочного анода литий-ионных аккумуляторов на основе пленок наноструктурированного кремния, покрытого двуокисью кремния. Патент РФ № 2474001, опубл. 27.01.2013.

50. Наноструктурированные кремниевые губки увеличат емкость акуумуляторов. URL: http://www.extremetech.com/

51. Аккумулятор из... песка. URL: http://ucrtoday.ucr.edu/ 52. Грин М. Структурированный кремниевый анод. Па-

тент РФ № 2325008, опубл. 20.05.2008. 53. Ученые Гарварда на 3D-принтере распечатали наноаккумулятор. URL: https://www.overclockers.ru/hardnews/ 54611/Uchenye\_Garvarda\_na\_3D-printere\_raspechatali\_nanoakkumulyator.html

54. Schaevitz S. B., Franz A. J., Jensen K. F., Schmidt M. A. A combustion-based MEMS thermoelectric power generator // Transducers' 01, The 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators. Munich, Germany. 2001. P. 30.

55. Создан прототип аккумулятора принципиально нового типа. URL: htth:// science compulente ru/409615.

56. Полупрозрачный Li-Ion аккумулятор заряжается от света. URL: http://techon.nikkeibp.co.jp/atclen/news\_en/ 15mk/090100006/

57. **Разработан** электрод, который в 3 раза увеличивает емкость литий-ионных аккумуляторов. URL: http:// rnd.cnews.ru/tech/news/top/index science.shtml?2013/0...

58. **Hybrid** Supercapacitor Trumps Thin-Film Lithium Battery. URL: http://www/eetimes.com/document.asp?doc\_id=1326224&

59. Шкляров С. Э., Осьмаков М. И., Краснов В. И. Устройство для накопления и хранения электрической энергии (варианты). Свидетельство РФ на полезную модель № 134695, опубл. 20.11.2013.

# Micro- and Nanotechnologies Applied to Production of Small-Size Primary Power Supplies

Corresponding author:

Smolin Valentin K., Ph. D., Senior Researcher, FSUE FRPC NIIIS named after Yu. Ye. Sedakov, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: niiis@niiis.nnov.ru

Received on July 06, 2016 Accepted on August 14, 2016

Modern power supplies are components of radioelectronic equipment intended for application in national economy, armed services, and space environment. Within the frames of the present work, the design principles of small-size renewable primary energy supplies are reviewed. The following issues are considered: efficient materials, including nanostructured ones, used in electronic engineering application as the bases for the power supplies' functional structures; elements formation and modification technologies; methods for devices' characteristics stabilization; improvement of energy conversion efficiency.

Keywords: power supply, photo-transformer, temperature transducer, isotopic element, fuel cell, storage cell, nanostructure

### For citation:

Smolin V. K. Micro- and Nanotechnologies Applied to Production of Small-Size Primary Power Supplies, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 244–256.

DOI: 10.17587/nmst.19.244-256

### Introduction

Power supplies provision for the national industry dealing with radioelectronic devices creation and use is a part of the task of country's economic security provision [1].

The greatest demand there is for renewable energy. Since technical progress is inseparably connected with integrated micro- and nanotechnologies development, it is feasible to use the developed physicochemical processes for primary power supplies production [2]. The processes in question imply that considerable changes occur in the whole solid phase's geometry or only in solid phase's inner areas' composition, properties, and structure, leaving the geometric dimensions basically intact.

A feature of the current stage of nanotechnology development is being a process, in which matter treatment methods or objects themselves offer new opportunities for approved technologies realization and ensure finding better solutions. Nanotechnology is presently the most dynamic sector of science and technology [3].

In the present paper, versions are discussed of renewable primary energy supplies (except mechanicalto-electric energy converters) and hybrid primary energy supplies creation using the achievements of microand nanotechnologies.

### Photoelectric transducers

Photoelectric transducers are the main elements of solar batteries. The term "photoelectric transducer generation" is sometimes used to describe the development of the transducer production technology.

First-generation photoelectric transducers were classical silicon elements with the traditional p-n junc-

tion. As a rule, those were plates of pure mono- or polycrystalline silicon 200 to 300  $\mu$ m thick, whose efficiency (17...22 %) and production cost were rather high.

The second-generation of photoelectric transducers are also based on *p*-*n* transition use, but they do not need silicon as the basic material. Tellurium/cadmium (CdTe) and copper/indium/gallium/selenium (CIGS) mixtures are the usual bases, as well as amorphous silicon. The thickness of these semiconductors' light absorbing layer is usually within the range of 1 to 3  $\mu$ m. The level of these photoelectric transducers production automation is higher and the production is cheaper than those of the first-generation supplies. The main drawback of the second generation is the efficiency fluctuating within the range of 7 to 15 %, depending on technology, which is lower than that of the first-generation transducers. The market share of the second generation is about 18 %.

The third generation of photoelectric transducers is also produced by thin-layer technologies. They lack the conventional *p*-*n* transition and, consequently, are not based on semiconductors. The main production development trend is photoelectric transducers creation based on organic polymer materials. The advantage of the third-generation elements is their low production cost and easiness of manufacture, while its drawback is low efficiency not exceeding 7 %. The market share of the third generation does not exceed 0.5 % [4-7].

The directions of photoelectric transducers development and perfection for energy loss reduction are as follows [8–10]:

• use of semiconductors with the forbidden band width optimum for solar radiation;

- targeted enhancement of semiconductor structure's properties via optimum doping and built-in electric fields generation;
- replacement of homogeneous with heterogeneous and variband semiconductor structures;
- optimization of photoelectric transducers' design parameters (*p-n* junction depth, base layer thickness, contact grid spacing etc.);
- using multipurpose optic coatings ensuring antireflection, thermal control, and photoelectric transducer protection against cosmic radiation;
- development of photoelectric transducers transparent in the long-wave part of the solar spectrum, beyond the boundary of the basic absorption band;
- cascade photoelectric transducers creation using semiconductors with the forbidden band width selected in such a way that in each cascade the radiation that has passed the previous cascade is converted.

It should be noted that the maximum efficiency has been achieved for GaInP/GaAs/Ge-based solar batteries with the photoelectric conversion efficiency of 32.0 % [11].

The concentration of solar radiation is an efficient method for elements' efficiency improvement. Estimated maximum efficiency of multi-junction elements comprising a few tens of cascades makes almost 87 %. In space environments, linear Fresnel lenses as the radiation concentrators are the most promising [12].

Using carbon nanotubes arranged into a "solar funnel" has enabled a research team from Massachusetts Institute of Technology (MIT) to concentrate solar energy 100 times more than a common photocell [13].

Another achievement of nanoelectronics, i.e., silicon nanowire structures, provide for higher radiation capture, as compared to a thin film, in the high-frequency region of the visible spectrum, due to the simultaneous action of two factors: low reflectivity and zero transmission [14].

An increase in solar battery efficiency can also be achieved by using "heteroelectrics" — materials in which solar radiation spectrum is transformed into single-frequency light, thus increasing the light-to-electricity conversion efficiency. The efficiency of a "heteroelecric" photocell is 54 % for visible light and 31 % for IR radiation, this considerably surpassing the world parameters of about 42 %. Besides, the mass of semiconductor per 1 W of energy for this photocell is 1000 times less than that in the known analogs [15].

### Thermoelectric transducers

One of the advantages of thermoelectric transducers is the absence of moving parts and, consequently, the absence of vibration, friction, wear, and the necessity to use liquids or gases under high pressure. Volumetric thermoelectric transducers successfully compete with the thin-film ones in the majority of parameters: diminutiveness, refrigerating parameters, and dynamic characteristics [4-7, 16-28].

The use of new materials such as quantum well thermoelectrics, skutterudites, functionally gradient materials and so on can be considered as the expansion of the capacities of thermoelectricity. R&D works are in progress aimed at the creation of thin-film devices with the capacities within the range from nW to tens of  $\mu$ W at high voltage (up to 5 V); specific power density of the devices remains at the level of 60...90  $\mu$ W/cm<sup>3</sup>. Silicon compositions, bismuth telluride, and complex semiconductors (for instance, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Bi<sub>2 - x</sub>Sb<sub>x</sub>Te<sub>3</sub>) are used as the base of the thermoelements.

Thin-film microdevice developments are considered in [17–24]. A schematic diagram of a thermoelectric microgenerator based on finely dispersed silicon polycrystalline material obtained by thin-film technology is presented in the fig. 1.

The device may operate as both radioisotope microgenerator and a device, in which air is a cooling agent, while the surface of a human body serves as a heater. Thermoelements of this kind are able to work at the temperature drop of 5 to 10 K.

### Radioisotope-powered sources of electric energy

Radioisotope-powered sources of electric energy may become a breakthrough in microelectronics when used in microelectromechanical systems (MEMS) and nanotechnologies. The need for wires and transformers for microdevices will disappear. Radioisotope-powered sources possess higher power density than chemical batteries, they are independent of environment conditions, and can operate within a wide temperature- and pressure ranges; also, they are autonomous and don't need to be recharged.

Ionizing radiation converters can be divided into thermal and nonthermal ones. In the thermal converters, electricity generation is due to a difference in temperatures. In converters of this type, radioisotopes are used as heaters, while the thermoelectric elements are mostly fabricated using bismuth telluride, silicon, and germanium (hot junction temperature may reach 270 °C). Conversion efficiency of these energy sources makes about 5 % [29–32].

Nonthermal radioisotope energy sources operation is based on incident radiation's energy direct or indirect conversion. The direct conversion is realized when electron-hole pairs are generated during particles passing through a beta-voltaic battery. The indirect conversion implies that the energy of the radioactive decay carried by alpha- or beta-particles is at first converted into visible light- or UV radiation with the use of luminescent materials, and then the light is converted into electricity with photogalvanic cells.

As the transducer materials for beta-voltaic batteries, they use traditional semiconductors. In the work [33], a

power supply is considered that consists of a sealed casing filled with tritium with a gallium-arsenide beta-radiationto electric current transducer inside it. During tritium half-life time, the gallium-arsenide beta-particle detector retains the ability to efficiently convert beta-radiation's energy into electric current. This life span is 4 times as long as it would be with a silicon transducer.

To increase the efficiency of beta-decay's energy capture and conversion, a structure with a developed surface is used. Estimation of the efficiency of microchannel silicon-based beta-converters shows that at the optimum microchannel width (3  $\mu$ m) and interchannel distance (10...12  $\mu$ m), the generation current density can reach 1600 nA/cm<sup>2</sup>. Design with a 3D diode on porous silicon provided for a 10-fold increase in the efficiency, as compared to the planar structure [34].

In Troitsk Institute of Innovative and Thermonuclear Research (TRINITI, Russia) physical principles are established for a stationary electrical generator development on the basis of long-lived radioactive isotopes. Radioactive decay's energy conversion into UV radiation is realized via nuclear-induced fluorescence in a specially selected gas (for example, in xenon) and after that UV photons' energy is converted into electric energy with a radiation-resistant diamond converter. Radioactive decay's energy conversion efficiency in excimer media may reach 50 %, while that of UV radiation energy-to-electric energy conversion may make 70 %. This makes generators of this kind 3 to 5 times as efficient as systems based on the use of thermal cycle or solar batteries [35].

### **Microfuel cells**

Microfuel cell (electrochemical generator) is a chemical current source consisting of a fuel cell stack and systems for reagents storage and supply and the reaction products removal, and of a control system as well [36]. A fuel cell's structure is presented in fig. 2 (see the 4-th side of cover).

The main part of a micro fuel cell is a central membrane with the catalyst-covered sides: one for the reaction with fuel and the other for the reaction with atmospheric oxygen. The methanol-air process taking place in the cells is the direct conversion of methanolbased fuel's energy into electric power with only two products formed at the output: carbon dioxide and steam [37].

For proton-exchange membranes production, they use fluoropolymers with ionized side groups in the chains, hydrocarbon polymers, and other non-fluorinated polymers. The most popular membrane is Nafion®, the perforated ion-exchange membrane discovered by DuPont Company in 1966. Almost all fuel cell membranes available are Nafion® membranes. Membranes based on the polymers of this type are high-tech products and their use provides for rather high performances at the working temperatures up to 90  $^{\circ}$ C [38].

Different porous layers (two electrodes and a membrane) combination in a single silicon plate provides the possibility to obtain a monolithic membrane electrode assembly (MEA), while the use of silicon micromechanics ensures external machinery creation and a monolithic fuel cell manufacture. The use of silicon is promising due to its versatility, which makes it possible to form gas-intake channels (micropores 1 to 10  $\mu$ m in size with the density of 10<sup>6</sup>...10<sup>7</sup> cm<sup>-2</sup>), low resistivity electrodes, gas diffusion layers on channel surfaces, and proton conducting membranes' frames.

Application of membranes of Nafion® perforated ionomer are not completely in agreement with standard microtechnologies; volume change the Nafion® membranes undergo on moisturizing is a problem, especially if silicon electrodes are present in the design. Mesoporous silica use provides the possibility to isolate anode and cathode from one another within MEA. Mesoporous silica's surface modification yields a solid reinforced electrolyte. In the work [39], a composite proton conducting membrane is offered that contains a porous silicon structure of macroporous silicon with its pores filled with an electrolyte based on polyvinyl alcohol esterified with phenol sulfonic acids.

Traditionally, a catalyst layer is applied onto the proton-conducting membrane by spraying so called "catalytic ink" (a catalyst on a carbon carrier mixed with liquid Nafion®). In order to reduce noble metals expenditures and obtain ultrathin layers of electrocatalysts, vacuum deposition is used, as well as electrochemical deposition, these methods leading to fuel cell cost reduction and an increase in catalyst utilization factor. Vacuum physical deposition is useful for thin catalytic layers creation on a membrane surface of a sophisticated shape. Platinum nanoparticles are experimentally proved to be 4 times as active catalysts than the large particles [40–42].

Membraneless fuel cells development is in progress, in which fuel and oxidizer are merged as a fluid jet in a microchannel. With these elements, standard technologies may be used for microcircuit manufacture; there is no need for comparatively complicated pumps [43-45]; the specific power of fuel "combustion" may reach 385 W/l.

### Accumulators

Accumulator production technologies are on the move. Traditional nickel-cadmium and nickel-metal hydride batteries are replaced with lithium-ion ones possessing high performance characteristics (for instance, high levels of discharge current specific capacity and density) [46].

Small-sized battery pack's capacity can be augmented by using electrodes based on homogeneous compacted solution of an electroconductive component and an active material capable of lithium absorption and release in the presence of electrolyte; the porosity of compacted electrodes makes 25 to 90 %. The active material is present in the form of hollow spheres with wall thickness up to 10  $\mu$ m or agglomerates of the maximum size of 30  $\mu$ m. A separator keeping apart two volumetric electrodes contains a highly porous electroinsulating ceramic material with open pores and the porosity of 30 to 95 % [47].

Negative electrodes for commercial lithium-ion accumulators are produced from carbon materials. Structures based on tin and silver and alloys, tin sulfides, and cobalt phosphides, and also carbon compositions with silicon nanoparticles are studied [48].

Silicon's specific capacity exceeds that of traditional graphite. With the insertion of lithium, this provides the opportunity to use it as the negative electrode's active material in lithium-ion accumulators operating at temperatures as low as -40 °C.

Silicon anode in lithium-ion accumulators has two serious drawbacks. The first is low Coulomb efficiency, which means that a charge transmitted through a silicon electrode is subject to a considerable loss. The other drawback consists in the fact that silicon material undergoes up to 300 % compaction and expansion during each charging cycle, which results in the generation of cracks reducing battery's efficiency, causes short circuits, and finally leads to the battery destruction.

It is important that the nanosilicon-based electrodes, unlike graphite ones, stay functional in contact with propylene carbonate-based electrolyte. In order to increase negative electrodes' specific capacity and Coulomb efficiency in charging and discharging processes in lithium-ion accumulators, a thin-film anode material formed of the nanosized silicon clusters coated with silica has been offered. The films are obtained in magnetron discharge plasma in argon containing 1 to 3 % (vol.) oxygen. The silica content of the film is within the range from 16 to 41 % (mass); the size of the silica-covered nanostructured silicon clusters is 5 to 15 nm [49].

A silicon nanotube-based double-walled anode shows an increased strength. The nanotubes are covered with a thin silica layer, which is strong enough to prevent their expansion. The anode endures 6000 chargedischarge cycles with no heavy damage, this providing a theoretical opportunity to achieve a 10-fold increase in lithium-ion battery's capacity [50, 51].

In the research reported in [52], a silicon anode is presented intended for a battery on a silicon- or a silicon-on-insulator substrate with an array of submicron silicon rods fixed thereon. The area covered with the array does not exceed a half of the surface area. The rods are 0.1 to 1.0  $\mu$ m in diameter and 1 to 10  $\mu$ m in height. At rod array manufacture, so-called "island lithography" is used, when a substrate is covered with cesium chloride film by vacuum sputtering, then the film is dissolved in water with semispherical isolated areas formation; after that ion-beam etching is carried out, according to the pattern defined by the cesium chloride mask.

The possibility is proved to create microscopic lithium-ion accumulators, in particular, the ones printed with a 3D printer [53].

### Hybrid power supplies

In author's opinion, the following devices can be conditionally considered as hybrid:

- devices realizing conversion of different kinds of energy into the electric energy and differing from conventionally classified power supplies in the total set, order, and condition of events;
- devices comprising both electric energy generators and accumulators.

Energy Chip technologies developed enable creating thermoelectric generators with fuel combustion chamber separated from the electric energy source. This will allow using any kind of heat, including natural heat sources and nuclear energy, for electric energy production. In the same way, using any kind of hydrocarbon fuel in the most preferred catalytic combustion mode will be possible, which will essentially decrease the negative impact on the environment [43].

Also, a thermal generator has been presented [54] based on catalytic combustion on a membrane. The device contains a gas-air mixture intake channel etched in a silicon plate covered with a thin silicon nitride membrane and a high-temperature Si—Ge based battery. The generator operates stably up to the temperature of 500 °C, which implies hydrogen, ammonia, or butane combustion; the output voltage is about 7 V; power is 75 mW.

A new "spin battery" is developed that can be charged by strong magnetic field application to nanomagnets located within magnetoresistive tunnel junctions (MTJ), that is, ensuring magnetic energy direct conversion into the electric one without intermediate chemical reactions. The structure of the accumulator based on  $A_3B_5$ semiconductors used as the functional materials is presented in the fig. 3 (see the 4-th side of cover) [55].

A semitransparent lithium-ion accumulator with 80- to 90-nm thick film electrodes has been created by Japan scientists. The accumulator can be charged by sunlight or another bright light source. In the absence of sunlight, the material is quite transparent: for instance, at the wavelength of 550 nm referring to the green light, the transparency of the discharged accumulator is about 60 %. In the sunlight, the device starts storing the charge, lithium density on the electrodes grows and the valence of the material changes so that the transparency goes down to 30 %. The main components of the electrodes were Li<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (LFP) for cathode and Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (LTO) and LiPF<sub>6</sub> (lithium hexafluorophosphate) for anode [56].

Devices of the second type comprise also supercapacitors (SC) (also electric double-layer capacitors, EDLC), these being functional hybrids of capacitors and electrochemical power sources. Their main field of application is backup power supplies [57].

Supercapacitors' advantages are the high speed of charging and discharging (supercapacitors get charged about 100...1000 times quicker than accumulators), charger's handiness, the longevity and compactness as compared to the electrolytic capacitors of the same capacity, and low toxicity of the materials. The use of nanostructured materials makes it possible to increase the capacity and prolong the service life of the devices.

Using the technique of gel-like graphene films capillary compression in the presence of a liquid electrolyte, one can obtain graphene sheets of high density with a distinct subnanometer-thick interlayer between the sheets. The liquid electrolyte plays a double role here: it preserves the minimum gap between the graphene sheets and, at the same time, it conducts the electricity.

They have succeeded in creating a supercapacitor with the energy storage density of 60 W  $\cdot$  h/l [58].

It is offered to use a system of azobenzene-modified carbon nanotubes as a base for a "solar accumulator" [59]. The operation principle of the device is storing the thermal energy of the Sun in chemical bonds of photoswitching molecules. On solar energy absorption by the molecules, the latter transit from one state to another with a change in molecular geometry, but no chemical reactions occur; the difference in energies of all the molecules is the measure of the amount of energy that can be stored by such an "accumulator". Nanotubes, in this case, are used to ensure the interaction between two azobenzene molecules. After the accumulated energy is released as heat, the substance can be "recharged" with the sunlight. With an "ideal accumulator" of this kind, the cycle may be repeated endlessly without any loss in efficiency.

### Conclusion

Small-sized power supply production is a scienceintensive sector of the industry. The appearance of integrated microtechnologies became possible, due to the development of basic processes of materials deposition, substances' atoms rearrangement, and dimensional processing.

The transition from micro- to nanotechnologies is accompanied with traditional materials (for example, silicon in various structural states), new complicated semiconductor structures and nanostructured compositions involvement into active usage. With a decrease in element's dimensions, processing methods also shift towards precision high-energy technologies (ion implantation, plasma chemical etching etc.). Simultaneously, the equipment and research material base necessary for the new methods realization are developed.

#### References

1. **Rybak A. L.** Mosch' i blagosostoyanie rossijskogo gosudarstva v sfere proizvodstva istochnikov elektropitaniya. *Elektronika: NTB*, 2000, no. 3, pp. 12–14 (in Russian).

2. Chistyakov Yu. D., Rajnova Yu. P. Vvedenie v processy integral'nyh mikro- i nanotehnologij: ucheb. posobie dlya vuzov. Vol. 1. Moscow: Izd-vo: BINOM. Laboratoriya znanij, 2010. 392 p. URL: <http://www.setbook.kz/books/publishers/publisher1541.html> (in Russian).

3. Glaz'ev S. Yu., Dement'ev V. E., Elkin S. V., Kryanev A. V., Rostovskij N. S., Firstov Yu. P., Haritonov V. V. Nanotehnologii kak klyuchevoj faktor novogo tehnologicheskogo uklada v ekonomike. Pod red. akad. RAN S. Yu. Glaz'eva i prof. V. V. Haritonova, Moscow, Trovant. 2009. 304 p. (in Russian).

4. **URL:** <http://solarsoul.net/tag/%25>

5. Hamakawa Y. (Ed.). Thin-Film Solar Cells. Next generation photovoltaics and its application. Springer. Photonics. UK. 15.10.2009.

6. Lianwei Wang, Jinchuan You, Jing Shi, Bobo Peng, and Paul K. Chu. Improving solar-cell efficiency, *Newsroom*. Hong Kong, China. 2008.

7. Allen Barnett, Douglas Kirtpatirick, Christiana Honscherg, Duncan Moore, Mark Wanlass, Keith Emery. Very high efficiency solar cell modules, *Progress in photovoltaics research and applications*. Wiley InterScience. 01.10.2008.

8. **Solnechnye** batarei. URL: http://www.membrana.ru/par-ticles/tag/177 (in Russian).

9. **Solnechnye** batarei. URL: http://works.doklad.ru/down-load/UVrw2u7iGWU.zip (in Russian).

10. **Solnechnye** batarei na kryshe Vashego doma. URL: <http:// forumodua.com/showthread.php?t=22542>.http://g-globalexpo. org/index.php/ru/component/content/article/65-solnechnayaenergetika/570-tonkoplenochnye-solnechnye-batarei (in Russian).

11. Garifulina M. R., Vlasov A. I., Makarchuk V. V., Adamovik N. Model' elementa solnechnoj batarei tipa CIGS, *Elektronnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal "Inzhenernyj vestnik"*, 2012, no. 8, pp. 1–21 (in Russian).

12. Alferov Zh. I., Andreev V. M., Rumyancev V. D. Tendencii i perspektivy razvitiya solnechnoj fotoenergetiki, *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 2004, vol. 38, vyp. 8, pp. 937–945 (in Russian).

13. Forum *Al'ternativnaya energetika*. URL: http://alterna-tivenergy.ru/forum/ (in Russian).

14. **Silicon** *Thin Film Solar Cells.* URL: http:// spie.org/x26848.xml

15. **Fel'dblyum V. Sh.** "Nano" na styke nauk: nanoob'ekty, nanotehnologii, nanobuduschee, *Elektronnoe mezhdisciplinarnoe izdanie*, Yaroslavl', 2013. 268 p. (in Russian).

16. **Gromov G.** Obemnye ili tonkoplenochnye termoelektricheskie moduli, *Komponenty i tehnologii*, 2014, no. 8, pp. 108–113 (in Russian).

17. Lim J. R., Snyder G. J., Huang C.-K. et al. Thermoelectric microdevice fabrication process and evaluation of the jet propulsion laboratory (JRL), *Proc. of the 21st Int. Conf. on Thermoelectrics. IEEE* — Long Beach, California, USA, 2002, 535 p.

18. Jacgnot A., Lin W. L., Chen G. et al. Fabrication and modeling of in-plane thermoelectric micro-generator, *Proc. of the 21st Int. Conf. on Thermoelectrics, IEEE* – Long Beach, California, USA, 2002, 561 p.

19. Bottner H., Nurnus J., Gavricov F., Kuhner G. New thermoelectric components using microsistem technologies, *J. of Microtlectromechanical Systems*, 2004, vol. 13, no. 3, pp. 414–420.

20. **Bottner H.** Micropelt miniaturized thermoelectric devises: small size? high cooling power densities, short response time, *Proc. of the 24st Int. Conf. on Thermoelectrics*, Clemson, USA, 2005, pp. 1–5.

21. **Tonkoplenochnaya** nanostruktura termoelektricheskogo generatora TEG sobiraet i pererabatyvaet rasseivaemoe teplo v elektrichestvo. URL: http:// www.globalsmt.net www.nextreme.com (in Russian). 22. **Groshev I., Poluhin I.** Sul'fid samariya i novejshie razrabotki na ego osnove, *Komponenty i tehnologii*, 2014, no. 8, pp. 150–157. URL: <a href="http://www.tenzo-sms.ru/d/681893/d/sulfid-samariya—i-noveyshie-razrabotki-na-ego-osnove.pdf">http://www.tenzo-sms.ru/d/681893/d/sulfid-samariya—i-noveyshie-razrabotki-na-ego-osnove.pdf</a> (in Russian).

23. **Tonkoplenochnyj** generator dlya pryamogo preobrazovaniya tepla v elektrichestvo, URL: <a href="http://www.russianelectronics.ru/leader-r/">http://www.russianelectronics.ru/leader-r/</a> (in Russian).

24. **Termo** *elektricheskie generatory*. URL: http:// www.pow-eredbythermolife.com (in Russian).

25. Goldsmid G. Primenenie termo elektrichestva. Fizmatlit, Moscow, 1963. 320 p. (in Russian).

26. **Rowe D. M.** *CRC handbook of thermoelectrics.* CRC Press, Boca Raton, London–N. Y. – Washington, 1995. 701 p. (in Russian).

27. **Pozdnyakov B. S., Koptelov E. A.** *Termoelektricheskaya energetika*, Moscow, Atomizdat, 1974. 264 p. (in Russian).

28. Gol'cman B. M., Dashevskij Z. M., Kajdanov V. I., Kolomoec N. V. *Plenochnye termoelementy: fizika i primenenie.* Moscow, Nauka, 1985. 119 p. (in Russian).

29. Platov A. I., Pustovalov A. A., Shapovalov V. P. i dr. Malogabaritnyj. radioieotopnyj istochnik pitaniya millivattnoj moschnosti dlya radioieotopnyh elektrokardiostimulyatorov, *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Ser. Radiacionnaya tehnika*, 1980, vyp. 20, pp. 12–16 (in Russian).

30. **Pustovalov A. A., Shaposhnikov V. P., Bovin A. V.** i dr. Radioieotopnye termoelektricheskie generatory dlya iiplantiruemyh elektrokardiostimulyatorov, *Atomnaya energiya*, *1986*, vol. 60, vyp. 2, pp. 125–129 (in Russian).

31. Baranov V. Yu., Pal' A. F., Pustovalov A. A., Starostin A. N., Suetin N. V., Filippov A. V., Fortov V. E. Radioizotopnye generatory elektricheskogo toka. V sb. *Izotopy: svojstva, poluchenie, primenenie.* V 2 t. Pod. red. Baranova V. Yu. Moscow, Fizmatlit, 2005, vol. 2, pp. 259–290 (in Russian).

32. **Rossijskaya** yadernaya batarejka budet rabotat' 12 let. URL: www.aethra <<u>http://www.aethra></u>. ru/news/140.htm (in Russian).

33. **Beta-gal'vanicheskaya** batareya. URL: <<u>http://www.ra-dioradar.net/print.html?</u> content\_id = 3562>... (in Russian).

34. Filippov A. V., Pal' A.F, Starostin A. N., Fortov V. E., Petrov O. F., D'yachenko P. P., Rykov V. A. Atomic battery based on ordered dust plasma structures. *Ukr. J. Phys.*, 2005, vol. 50, no. 2, pp. 137–143.

35. Filippov A. V. Fotovol'taicheskij istochnik energii na osnove uporyadochennyh plazmenno-pylevyh struktur. Enciklopediya nizkotemperaturnoj plazmy. Seriya A. Progress v fizike i tehnike nizkotemperaturnoj plazmy. Tom I-2. Pylevaya plazma. Pod red. V. E. Fortova, Moskva, Yanus-K, 2006, pp. 409–428 (in Russian).

36. **Sysoeva S.** Mnogoobrazie mikrosistemnyh innovacij: novye tehnologii i igroki, *Komponenty i tehnologii*, 2011, no. 9, pp. 41–48 (in Russian).

37. **Bilonenko R. A.** Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya toplivnyh elementov, *Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*, 2013, no. 6 (103), pp. 84–93 (in Russian).

38. Astrova E. V., Nechitajlov A. A., Zabrodskij A. G. Kremnievye tehnologii dlya mikrotoplivnyh elementov. *International Scientitic Jornal for Alternative Energy and Ecology ISYAEE*, 2007, no. 2 (46), pp. 60–65 (in Russian).

39. Starkov V. V., Pisareva A. V., Aldoshin S. M., Sanginov E. A., Lyskov N. V., Dobrovol'skij Yu. A., Volkov E. V. Kompozitnaya protonprovodyaschaya membrana i sposob ee izgotovleniya. Patent RF № 2373990, opubl. 27.11.2009 (in Russian). 40. Grinberg V., Skundin A., Nizhnikovskij E. Sovremennoe sostoyanie i tendencii razvitiya mikrotoplivnyh elementov, *Sovremennaya elektronika*. 2012, no. 1, pp. 10–15 (in Russian).

41. **Grinberg V. A., Skundin A. M.** Mikrotoplivnye elementy:sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya (obzor), *Elektrohimiya*, 2010, vol. 46, no. 9, pp. 1027–1043 (in Russian).

42. Zabrodskij A. G., Gurevich S. A. Mikro- i nanotehnologii dlya portativnyh toplivnyh elementov / P-05. *Chetvertaya rossijskaya konferenciya "Fizicheskie problemy vodorodnoj energetiki"* Sankt-Peterburg, 26–28 noyabrya 2007, Fiziko-tehnicheskij institut im. A. F. Ioffe RAN-S-1-2 (in Russian).

43. **Funkcional'nye** *nanomaterialy dlya energetiki*. URL: <http:// www.google.ru/url?url=http://rudocs.exdat.com/docs/index-95664 (in Russian).

44. **Shlenchak S. A.** *Bezmembrannye toplivnye elementy*. URL: http:// alternativenergy. ru/tehnologii/ po materialam sajta www.physorg.com/ < http://www.physorg.com/> (in Russian).

45. **Bakatkin A.** Mikroskopicheskie toplivnye elementy dlya mikroelektroniki. URL: http:// physorg.com <http://www.physorg.com/>/ (in Russian).

46. Litij-ionnye akkumulyatory. URL: http://www.powerin-fo.ru/accumulator-liion.php

47. Prohazka Zh., Prohazka Zh. Zhr. Litievyj akkumulyator i sposob ego izgotovleniya. Patent RF № 2519935, opubl. 20.06.2014. (in Russian).

48. **Rekord** *udel'noj emkosti litij-ionnogo akkumulyatora ot Envia Systems*. URL: http://enviasystems.com/ (in Russian).

49. Berdnikov A. E., Kulova T. L., Mironenko A. A., Rudyj A. S., Gusev V. N., Metlickaya A. V., Skundin A. M., Geraschenko V. N. Sposob izgotovleniya tonkoplenochnogo anoda litij-ionnyh akkumulyatorov na osnove plenok nanostrukturirovannogo kremniya, pokrytogo dvuokis'yu kremniya. Patent RF № 2474001, opubl. 27.01.2013. (in Russian).

50. **Nanostrukturirovannye** kremnievye gubki uvelichat emkosť akuumulyatorov. URL: http://www.extremetech.com/ (in Russian).

51. Akkumulyator *iz... peska*. URL: http://ucrtoday.ucr.edu/ (in Russian).

52. **Grin M.** *Strukturirovannyj kremnievyj anod*. Patent RF № 2325008, opubl. 20.05.2008. URL: <a href="http://www.findpatent.ru/byauthors/335965/">http://www.findpatent.ru/byauthors/335965/></a> (in Russian).

53. Uchenye Garvarda na 3D-printere raspechatali nano-akkumulyator. URL: <a href="https://www.overclockers.ru/hardnews/54611/">https://www.overclockers.ru/hardnews/54611/</a> Uchenye\_Garvarda\_na\_3D-printere\_raspechatali\_nano-akkumulyator.html> (in Russian).

54. Schaevitz S. B., Franz A. J., Jensen K. F., Schmidt M. A. A combustion-based MEMS thermoelectric power generator, *Transducers' 01, The 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators.* Munich, Germany, 2001, 30 p.

55. **Sozdan** prototip akkumulyatora principial'no novogo tipa. URL: htth:// science compulente ru/409615 (in Russian).

56. **Poluprozrachnyj** *Li-Ion akkumulyator zaryazhaetsya ot sveta.* URL: http://techon.nikkeibp.co.jp/atclen/news\_en/15mk/090100006/ (in Russian).

57. **Razrabotan** *elektrod*, *kotoryj* v 3 raza uvelichivaet emkosť litij-ionnyh akkumulyatorov. URL: http://rnd.cnews.ru/tech/ news/top/index\_science.shtml?2013/0... (in Russian).

58. **Hybrid** *Supercapacitor Trumps Thin-Film Lithium Battery*. URL: http://www/eetimes.com/document.asp?doc\_id=1326224&.

59. Shklyarov S. E., Os'makov M. I., Krasnov V. I. Ustrojstvo dlya nakopleniya i hraneniya elektricheskoj energii (varianty). Svidetel'stvo RF na poleznuyu model', no. 134695, opubl. 20.11.2013 (in Russian).

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский 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.

урнал зарстистрирован в Федеральной служее по насосру за соолюдением законодательства в сфере массовых коммуникации 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 21.02.2017. Подписано в печать 20.03.2017. Формат 60×88 1/8. Заказ МС0417. Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru



**Рис. 2. Области применения СВЧ-приборов на GaAs [12]** *Fig. 2. Applications of microwave devices on GaAs [12]* 



**Рис. 4. Развитие рынка подложек GaAs и прогноз [11]** Fig. 4. The development of the market for GaAs substrates and forecast [11]

### Рисунки к статье В. К. Смолина

### «ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПЕРВИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ»

V. K. Smolin

### «MICRO- AND NANOTECHNOLOGIES APPLIED TO PRODUCTION OF SMALL-SIZE PRIMARY POWER SUPPLIES»







Рис. 3. Структура спинового аккумулятора Fig. 3. Spin accumulator structure