

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА



NANO-
TECHNOLOGY

ISSN 1813-8586

Том 20. № 5. 2018

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

NANO- and MICROSYSTEMS
TECHNOLOGY

Vol. 20, No. 5, 2018

The articles are published
in Russian and English

Рисунки к статье А. А. Герасина, Ф. Р. Исмагилова, В. Е. Вавилова, А. М. Веселова,

А. Х. Миниярова, В. В. Айгузиной

**«ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ И ИСПЫТАНИЕ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА
ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МИКРОБЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ»**

A. A. Gerasin, F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, A. M. Veselov, A. Kh. Miniyarov, V. V. Ayguzina

**«DESIGN, OPTIMIZATION AND TESTING OF HIGH-SPEED MAGNETOELECTRIC GENERATOR
FOR POWER SUPPLY OF MICRO-UNMANNED AERIAL VEHICLES»**



Рис. 1. Магнитопроводы из аморфного железа, созданные по предложенной технологии:
a – без спинки статора; b – со спинкой статора

Fig. 1. Magnetic cores from amorphous iron, created by the proposed technology:
a – without stator back; b – with stator back

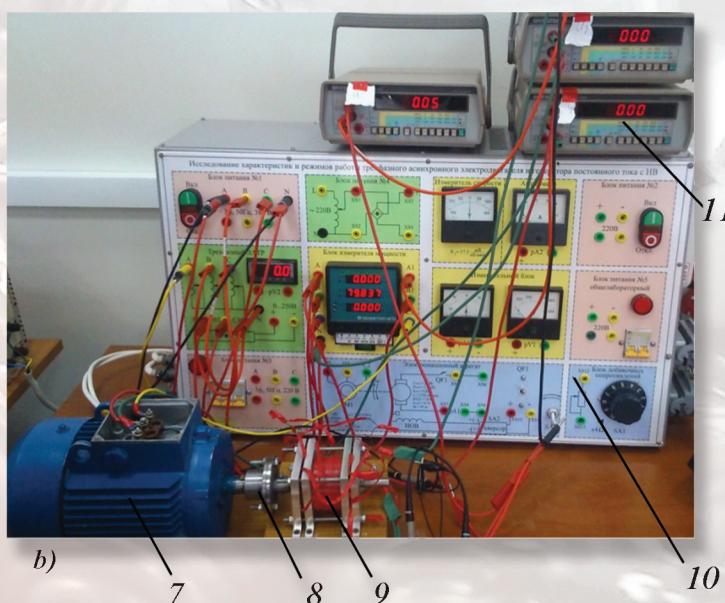
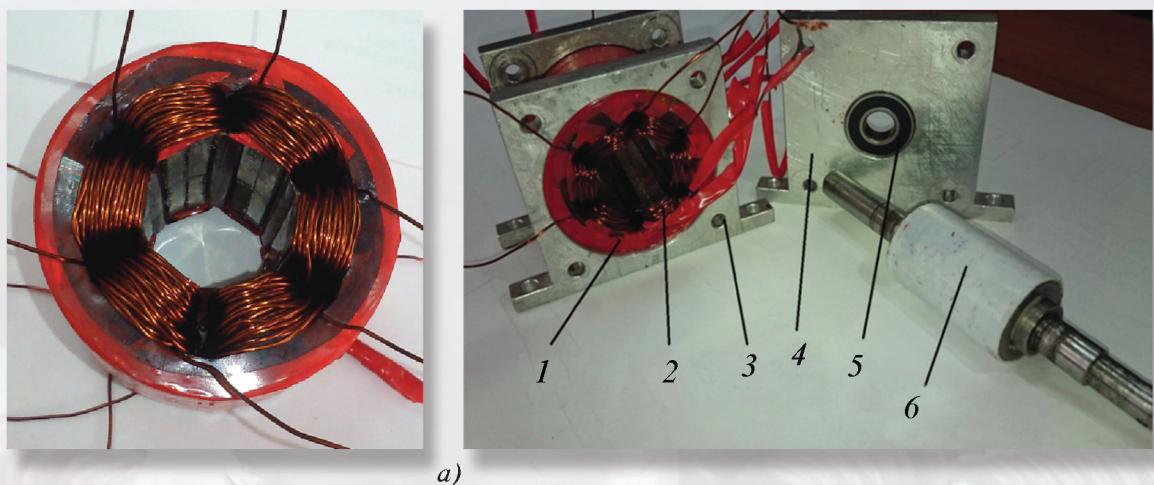


Рис. 3. Экспериментальный макет МЭГЗО
(a) и измерительный стенд (b):

1 – магнитопровод статора; 2 – обмотка статора; 3 – станина; 4 – подшипниковый щит; 5 – подшипник; 6 – ротор; 7 – приводной двигатель; 8 – муфта; 9 – экспериментальный макет; 10 – экспериментальная установка; 11 – измерительные устройства

Fig. 3. Experimental TCMEG model (a) and measuring stand (b):

1 – stator magnetic core; 2 – stator winding;
3 – housing; 4 – bearing shield; 5 – bearing;
6 – rotor; 7 – drive motor; 8 – coupling;
9 – experimental model; 10 – experimental installation;
11 – measuring devices

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 20. № 5 ◆ 2018

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

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

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

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

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

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

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

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

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционная коллегия:

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

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

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай)

Басаев А. С., к.ф.-м.н.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Горнев Е. С., д.т.н., проф.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Кузнецов В. И., д.т.н. (Нидерланды)

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

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

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония)

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

Сингх К., к.т.н. (Индия)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н.

Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Григорин-Рябова Е. В.

Чугунова А. В.

Фокин В. А., к.х.н. (ред. перевода)

Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

Издается с 1999 г.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Козлов Г. В., Долбин И. В. Влияние взаимодействий нанонаполнителя на степень усиления нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки 259

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Герасин А. А., Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Веселов А. М., Минияров А. Х., Айгузина В. В. Проектирование, оптимизация и испытание высокоскоростного магнитоэлектрического генератора для электроснабжения микробеспилотных летательных аппаратов 267

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Стецюра С. В., Харитонова П. Г. Исследование гетерофазных поликристаллических пленок на основе сульфида кадмия с добавлением сульфида свинца 277

Васильев В. Ю. Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 1. Термически активированные процессы в проточных реакторах 287

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Шалимов А. С., Тимошенков С. П., Симонов Б. М., Шишов А. М., Головинский М. С., Собанин Р. О. Расчет надежности чувствительного элемента микромеханического гироскопа 297

Амеличев В. В., Резнев А. А. Микросистемы на основе тонкопленочных анизотропных магниторезистивных преобразователей магнитного поля и тока 303

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

Абрамов И. И. Сознание человека, или возможности электроники. Часть I 308

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"

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 20
No. 5
2018

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY CHIEF EDITOR

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

DEPUTY CHIEF EDITOR

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

Editorial council:

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

Editorial board:

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

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

Kozlov G. V., Dolbin I. V. Influence of the Nanofiller Interactions on the Reinforcement Degree of the Nanocomposites of the Polymer/Carbon Nanotubes 263

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Gerasin A. A., Ismagilov F. R., Vavilov V. E., Veselov A. M., Miniyarov A. Kh., Ayguzina V. V. Design, Optimization and Testing of High-Speed Magnetoelectric Generator for Power Supply of Micro-Unmanned Aerial Vehicles 273

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Stetsyura S. V., Kharitonova P. G. Investigation of the Heterogeneous Polycrystalline Films Based on Cadmium Sulfide with Addition of Lead Sulfide 283

Vasilyev V. Yu. Silicon Nitride Thin Film Deposition for Microelectronics and Microsystem Technologies. Part 1. Processes in Flow Reactors with Thermal Activation 292

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Shalimov A. S., Timoshenkov S. P., Simonov B. M., Shishov A. M., Golovinsky M. S., Sobanin R. O. Calculation of Reliability of the Sensitive Element of a MEMS Gyroscope 300

Amelichev V. V., Reznev A. A. Microsystems Based on Thin-film Anisotropic Magnetoresistive Converters of Magnetic Field and Current 306

MOLECULAR ELECTRONICS AND BIOELECTRONICS

Abramov I. I. Human Consciousness, or Possibilities of Electronics. Part I 315

Our:	To subscribe, please contact with:
Web: www.microsystems.ru/eng :	JSC "MK-Periodica":
e-mail: nmst@novtex.ru	Tel: +7 (495) 672-7012
	Fax: +7 (495) 306-3757
	E-mail: import@periodicals.ru

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

УДК 541.64: 546.26

DOI: 10.17587/nmst.20.259-266

Г. В. Козлов, ст. науч. сотр., **И. В. Долбин**, канд. хим. наук, доц., e-mail: i_dolbin@mail.ru
ФГБОУ ВО "Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова",
г. Нальчик, Россия

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НАНОНАПОЛНИТЕЛЯ НА СТЕПЕНЬ УСИЛЕНИЯ НАНОКОМПОЗИТОВ ПОЛИМЕР/УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

Поступила в редакцию 07.11.2017

Показано, что основным параметром, определяющим свойства полимерных нанокомпозитов, а также и других наноматериалов, является доля поверхностей раздела полимерная матрица — нанонаполнитель. В рамках переколяционной теории усиления указанная доля определяет критический индекс i , следовательно, степень усиления нанокомпозитов. Важную роль играет тип взаимодействий частиц (агрегатов частиц) нанонаполнителя.

Ключевые слова: нанокомпозит, углеродные нанотрубки, поверхности раздела, взаимодействия, переколяция, степень усиления

Введение

В последние 25 лет исследованию полимерных нанокомпозитов уделяется большое внимание, что выражается в резком увеличении публикаций, посвященных этому вопросу [1]. За это время разработано большое число нанокомпозитов с нанонаполнителями разных классов и использующих самые разные полимеры в качестве матриц. Однако совершенно очевиден большой дисбаланс в практическом аспекте и теоретической трактовке указанных наноматериалов. Для количественного описания свойств нанокомпозитов в основном используется правило смесей в разных его модификациях, а также производные от него микромеханические модели [2], которые имеют ряд присущих им недостатков. Во-первых, в них используются свойства компонентов нанокомпозитов (матричного полимера и нанонаполнителя), а не структурные показатели. Во-вторых, в них применяются исходные характеристики указанных компонентов, которые для нанокомпозитов могут существенно отличаться от реальных показателей этих же компонентов в полимерном нанокомпозите, что обусловлено двумя типичными для этих наноматериалов эффектами: агрегацией исходных частиц нанонаполнителя и формированием межфазных областей. Так, авторы работы [3] предложили методику расчета модуля упругости указанных компонентов $E_{\text{арп}}$ и $E_{\text{мф}}$ и обнаружили, что для нанокомпозитов поливиниловый

спирт/углеродные нанотрубки $E_{\text{арп}} = 71 \pm 55$ ГПа и $E_{\text{мф}} = 46 \pm 5,5$ ГПа при номинальных значениях модуля упругости углеродных нанотрубок ~ 1000 ГПа и матричного полимера ~ 2 ГПа. Таким образом, микромеханические модели используют не реальные, а фиктивные значения указанных параметров. Такой же вывод в случае анизотропных нанонаполнителей (углеродные нанотрубки, органоглина, графен и т.п.) можно сделать и относительно их аспектного отношения [4].

Указанные недостатки микромеханических моделей привели к разработке новых теоретических подходов, использующих принципиально отличающийся базис. Во-первых, трактовка полимерных нанокомпозитов как случайных смесей позволяет использовать для их описания переколяционные модели [5]. Эти модели были успешно применены для описания свойств нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки [6–8]. Во-вторых, специфическим для углеродных нанотрубок видом агрегации является формирование ими кольцеобразных структур [4], что обусловлено высоким аспектным отношением и низкой поперечной жесткостью этого нанонаполнителя. Указанное обстоятельство позволяет моделировать упомянутые кольцеобразные структуры как макромолекулярные клубки [9–11]. И, в третьих, фундаментальной основой является решающая роль многочисленных поверхностей раздела фаз в наноматериалах вообще как

база для существенного изменения свойств твердых тел [12]. Этот принцип является корректным и для полимерных нанокомпозитов [13]. Исходя из сказанного выше, целью настоящей работы является описание степени усиления нанокомпозитов полипропилен/углеродные нанотрубки (нановолокна) на основе трех указанных выше принципов.

Эксперимент

В качестве матричного полимера был использован полипропилен (ПП) "Каплен" промышленного производства марки 01 030, имеющий средневесовую молекулярную массу $(2...3) \cdot 10^3$ и индекс полидисперсности 4,5. В качестве нанонаполнителя применяли углеродные нанотрубки (УНТ) марки "Таунит", имеющие наружный диаметр 20...70 нм, внутренний диаметр 5...10 нм и длину более 2 мкм. Кроме того, были использованы многослойные нановолокна (УНВ), имеющие число слоев 20...30, диаметр 20...30 нм и длину более 2 мкм. Массовое содержание нанонаполнителя обоих типов варьировалось в пределах 0,15...3,0 масс. %.

Нанокомпозиты ПП/УНТ и ПП/УНВ были получены смешиванием компонентов в расплаве на двухшнековом экструдере Thermo Haake, модель Reotemp RTW 25/42, производство ФРГ. Смешивание выполнено при температуре 463...503 К и частоты вращения шнека 50 мин⁻¹ в течение 5 мин. Образцы для испытаний получены методом литья под давлением на литьевой машине Test Sample Molding Apparatus RR/TS MP фирмы Ray-Ran (Тайвань) при температуре 483 К и давлении 43 МПа.

Механические испытания на одноосное растяжение были выполнены на образцах в форме двухсторонней лопатки с размерами согласно ГОСТ 112 62—80. Испытания проводили на универсальной испытательной машине Gotech Testing Machine CT-TCS 2000 производства ФРГ при температуре 293 К и скорости деформации $\sim 2 \times 10^{-3}$ с⁻¹.

Результаты и обсуждение

Как отмечалось выше, углеродные нанотрубки (нановолокна) формируют в полимерной матрице нанокомпозита кольцеобразные структуры, радиус которых $R_{\text{УНТ}}$ можно определить с помощью следующего соотношения [14]:

$$(2R_{\text{УНТ}})^3 = \frac{\pi L_{\text{УНТ}} r_{\text{УНТ}}^2}{\varphi_h}, \quad (1)$$

где $L_{\text{УНТ}}$ и $r_{\text{УНТ}}$ — длина и радиус углеродной нанотрубки соответственно; φ_h — объемное содержание нанонаполнителя, которое можно оценить согласно известной формуле [15]

$$\varphi_h = \frac{W_h}{\rho_h},$$

где W_h — массовое содержание нанонаполнителя; ρ_h — его плотность, определяемая следующим образом [15]:

$$\rho_h = 188(2r_{\text{УНТ}})^{1/3}, \text{ кг/м}^3,$$

где $r_{\text{УНТ}}$ дается в нанометрах.

Как показано в работе [12], относительная доля поверхностей раздела фаз $\varphi_{\text{пр}}$ оценивается согласно соотношению

$$\varphi_{\text{пр}} = \frac{3s}{L}, \quad (2)$$

где s — ширина приграничной области; L — размер зерна в наноматериалах.

Применительно к рассматриваемым нанокомпозитам соотношение (2) можно записать следующим образом:

$$\varphi_{\text{пр}} = \frac{3l_{\text{мф}}}{R_{\text{УНТ}}},$$

где $l_{\text{мф}}$ — толщина межфазного слоя.

Величина $l_{\text{мф}}$ определена с помощью формулы [14]

$$\varphi_{\text{мф}} = \varphi_h \left[\left(\frac{r_{\text{УНТ}} + l_{\text{мф}}}{r_{\text{УНТ}}} \right)^3 - 1 \right],$$

где $\varphi_{\text{мф}}$ — относительная доля межфазных областей, которая рассчитывается с помощью следующего перколяционного соотношения [14]:

$$\frac{E_h}{E_m} = 1 + 11(\varphi_h + \varphi_{\text{мф}})^{1,7},$$

где E_h и E_m — модули упругости нанокомпозита и матричного полимера соответственно (отношение E_h/E_m принято называть степенью усиления нанокомпозита).

И, наконец, в рамках перколяционной модели усиления нанокомпозитов величина E_h/E_m определяется формулой [6, 7]

$$\frac{E_h}{E_m} = 1 + 11(\varphi_h)^a, \quad (3)$$

где a — перколяционный индекс, близкий к стандартным индексам перколяции β , v и t .

Близость индекса a к тому или иному стандартному индексу перколяции отражает тип армирующей компоненты нанокомпозита. Так, при $a \approx \beta \approx 0,40$ нанокомпозит усиливается межфазными областями (истинные нанокомпозиты), при $a \approx v \approx 0,80$ — совокупностью нанонаполнителя и межфазных областей и при $a \approx t \approx 1,60$ — только нанонаполнителем или наполнителем (микрокомпозиты). Таким образом, введение в полимерную матрицу исходных частиц нанометрового размера не гарантирует получения в конечном итоге нанокомпозита [6].

На рис. 1 приведена зависимость индекса a от доли поверхностей раздела фаз $\varphi_{\text{пр}} = (3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}})$

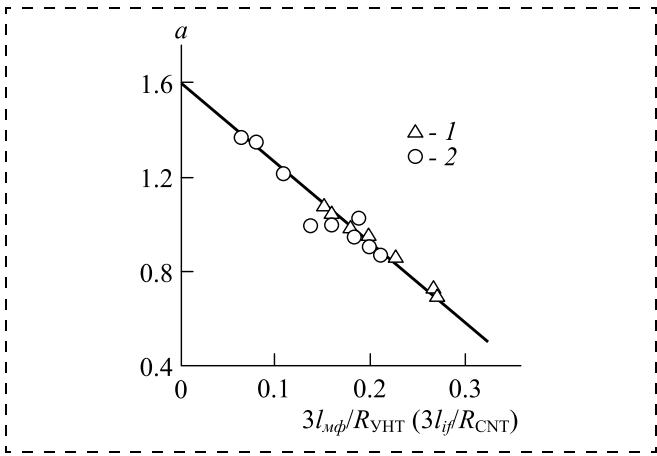


Рис. 1. Зависимость перколоционного индекса a в уравнении (3) от относительной доли поверхностей раздела фаз $(3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}})$ для нанокомпозитов ПП/УНТ (1) и ПП/УНВ (2)

Fig. 1. Dependence of the percolation index a in the equation (3) on the relative fraction of the phase division surfaces $(3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}})$ for the nanocomposites of PP/CNT (1) and PP/CNF (2)

для нанокомпозитов ПП/УНТ и ПП/УНВ. Эта зависимость показывает линейный спад a по мере роста $(3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}})$, что согласно уравнению (3) означает повышение $E_{\text{H}}/E_{\text{M}}$. Соотношение между параметрами a и $(3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}})$ описывается следующим уравнением:

$$a = 1,6 - 3,35(3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}}) \quad (4)$$

или

$$a = t - 3,35(3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}}). \quad (5)$$

График на рис. 1 позволяет сделать ряд выводов. Во-первых, рассматриваемыеnanoструктурированные полимерные композиты в основном относятся к категории промежуточных нанокомпозитов. Во-вторых, истинные нанокомпозиты ($a \leq 0,40$) реализуются при $(3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}}) > 0,37$, что достаточно близко к оценке $\Phi_{\text{мф}} > 0,50$, сделанной в работе [12]. И, в-третьих, уравнения (4) и (5) демонстрируют, что снижение индекса a может быть реализовано либо при увеличении $l_{\text{мф}}$, либо при уменьшении $R_{\text{УНТ}}$.

Авторы работы [16] показали важную роль взаимодействий между нанотрубками для усиления нанокомпозитов полиметилметакрилат/функционализированные многослойные нанотрубки. В рамках микромеханических моделей [2] было обнаружено, что появление указанного взаимодействия приводит к изменению категории этих наноматериалов от истинных нанокомпозитов к промежуточным. Оценить взаимодействия между кольцеобразными формированиями можно в рамках их моделирования как макромолекулярных клубков [4]. Фрактальная размерность D_f указанных формирований определяется с помощью следующего уравнения [9]:

$$R_{\text{УНТ}} = 3,4\Phi_{\text{н}}^{-1/(d-D_f)},$$

где d — размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал (очевидно, в нашем случае $d = 3$).

Взаимодействия между кольцеобразными формированиями углеродных нанотрубок в рамках указанной аналогии определяются параметром ε , связанным с размерностью D_f уравнением [16]

$$D_f = \frac{2}{\varepsilon + 1}. \quad (6)$$

Поскольку вариация D_f составляет 1...3 [6], то согласно уравнению (6) получим вариацию $\varepsilon = 1...-1/3$. При $D_f = 2,0$, т.е. аналогии с макромолекулярным клубком в идеальном θ -растворителе, $\varepsilon = 0$ и взаимодействия между кольцеобразными формированиями отсутствуют. При D_f меньше 2,0 значения ε положительны, что соответствует взаимодействиям отталкивания, а при $D_f > 2,0$ значения ε отрицательны, что соответствует взаимодействиям притяжения [16].

На рис. 2 приведены зависимости доли поверхностей раздела фаз $\Phi_{\text{мф}} = (3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}})$ от параметра ε для рассматриваемых нанокомпозитов. Как можно видеть, эти зависимости распадаются на два линейных участка с граничным значением $\varepsilon = 0$. При положительных значениях ε , т.е. взаимодействиях отталкивания между кольцеобразными формированиями, величина $(3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}})$ не зависит от ε и постоянна: $(3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}}) = \text{const} \approx 0,268$ для нанокомпозитов ПП/УНТ и $(3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}}) = \text{const} \approx 0,192$ для ПП/УНВ. Очевидно, что согласно уравнениям (4) и (5) в этом случае индекс a также является постоянной величиной, равной $\sim 0,70$ для ПП/УНТ и $\sim 0,96$ для ПП/УНВ. Можно предположить, что постоянные значения $(3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}})$ при $\varepsilon > 0$ являются характеристикой качества нанокомпозита, поскольку именно они определяют минимальное

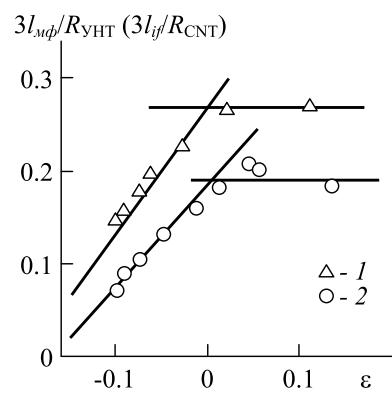


Рис. 2. Зависимости относительной доли поверхностей раздела фаз $(3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}})$ от параметра взаимодействия кольцеобразных формирований нанонаполнителя ε для нанокомпозитов ПП/УНТ (1) и ПП/УНВ (2)

Fig. 2. Dependence of the relative fraction of the phase division surfaces $(3l_{\text{мф}}/R_{\text{УНТ}})$ on the parameter of interaction of the ring-shaped formations of the nanofiller ε for the nanocomposites of PP/CNT (1) and PP/CNF (2)

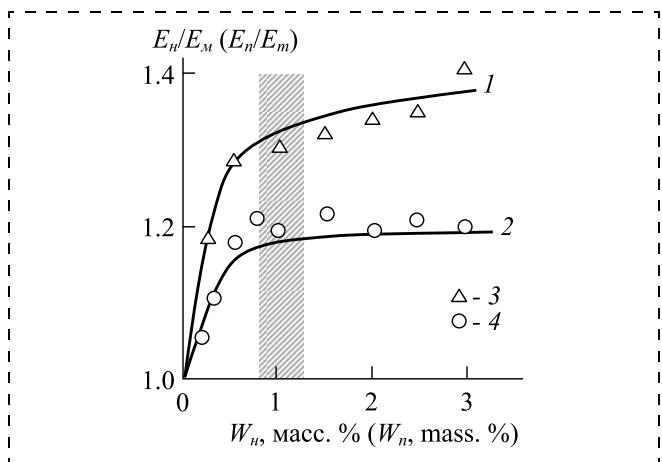


Рис. 3. Сравнение рассчитанных согласно уравнениям (3) и (4) (1, 2) и полученных экспериментально (3, 4) зависимостей степени усиления E_n/E_m от массового содержания нанонаполнителя W_n для нанокомпозитов ПП/УНТ (1, 3) и ПП/УНВ (2, 4). Заштрихованная область показывает интервал критических структурных точек φ_c , φ_n^{agr} и φ_n^{cr} для указанных нанокомпозитов

Fig. 3. Comparison of the calculated according to the equations (3) and (4) (1, 2) and received experimentally (3, 4) dependences of the degree of reinforcement E_n/E_m on the mass content of nanofiller W_n for the nanocomposites of PP/CNT (1, 3) and PP/CNF (2, 4). The dashed area shows the interval of the critical structural points of φ_c , φ_n^{agp} and φ_n^{cr} for the above nanocomposites

значение a (см. рис. 1) и, следовательно, максимально достижимое значение E_n/E_m при фиксированном значении φ_n .

На рис. 3 приведено сравнение рассчитанных согласно уравнениям (3) и (4) и полученных экспериментально зависимостей степени усиления E_n/E_m от массового содержания нанонаполнителя W_n для рассматриваемых нанокомпозитов. Как следует из этого сравнения, получено хорошее соответствие теории и эксперимента — их среднее расхождение составляет $\sim 2,5\%$, что даже меньше погрешности эксперимента при определении параметра E_n/E_m .

И в заключение рассмотрим причины изменения градиента dE_n/dW_n при содержании УНТ (УНВ) ~ 1 масс. % для рассматриваемых нанокомпозитов. Как показано в работе [6], для нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки существуют три критические точки для структуры нанонаполнителя в полимерной матрице. Первой такой критической точкой на шкале концентраций является порог перколяции углеродных нанотрубок φ_c , который наиболее просто определяется следующим образом [6]:

$$\varphi_c = 0,6 \left(\frac{2r_{\text{УНТ}}}{L_{\text{УНТ}}} \right). \quad (7)$$

Уравнение (7) дает следующие значения порога перколяции углеродных нанотрубок (нановолокон): для нанокомпозитов ПП/УНТ $\varphi_c = 0,90$ масс. % и $\varphi_c = 0,69$ масс. % — для ПП/УНВ. Второй критической точкой является порог агрегативной устой-

чивости нанонаполнителя φ_n^{agr} , выше которого начинается его агрегация. Величина φ_n^{agr} определена согласно уравнению [16–18]:

$$\varphi_n^{agr} = \frac{\gamma k T}{\sigma_m a_{\text{стр}}^2}, \quad (8)$$

где $\gamma \approx 10$ — безразмерная константа; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; σ_m — поверхностная энергия; $a_{\text{стр}}$ — размер структурной единицы.

В качестве T принята температура получения рассматриваемых нанокомпозитов ($T = 463$ К), $\sigma_m = 0,10$ Дж/м² [16] и $a_{\text{стр}} = 2r_{\text{УНТ}}$. При использовании указанных параметров оценки согласно уравнению (8) дают $\varphi_n^{agr} = 0,96$ масс. % для нанокомпозитов ПП/УНТ и $\varphi_n^{agr} = 1,35$ масс. % для ПП/УНВ.

И, наконец, третьей критической точкой является содержание нанонаполнителя φ_n^{cr} , при которой он образует "замкнутые" кольцеобразные формирования с критическим радиусом $R_{\text{УНТ}}^{kp}$ [6]:

$$R_{\text{УНТ}}^{kp} = \frac{L_{\text{УНТ}}}{2\pi}. \quad (9)$$

Оценив величину $R_{\text{УНТ}}^{kp}$ согласно уравнению (9), можно рассчитать значение φ_n^{kp} с помощью соотношения (1). Значение φ_n^{kp} оказалось равным 0,80 масс. % для нанокомпозитов ПП/УНТ и ПП/УНВ. Следовательно, все указанные критические структурные точки нанонаполнителя в полимерной матрице укладываются в достаточно узкий интервал его концентраций, а именно 0,80...1,35 масс. %, который показан на рис. 3 заштрихованной областью. Как можно видеть, эта область на шкале концентраций нанонаполнителя хорошо согласуется с концентрацией, при которой происходит изменение градиента $d(E_n/E_m)/dW_n$. Это обстоятельство позволяет предположить, что три указанные выше критические структурные точки нанонаполнителя имеют одинаковый физический смысл и реализуются практически одновременно.

Заключение

Таким образом, результаты настоящей работы показали, что в нанокомпозитах полимер/углеродные нанотрубки (нановолокна) основным фактором изменения их свойств является относительная доля поверхностей раздела фаз, как и для всех наноматериалов вообще. При наличии взаимодействий отталкивания между кольцеобразными формированиями углеродных нанотрубок указанная доля постоянна и максимальна, что делает возможным ее использование в качестве базовой характеристики нанокомпозита. Появление взаимодействий притяжения приводит к резкому снижению относительной доли поверхностей раздела фаз, что в конечном итоге определяет снижение степени

усиления нанокомпозитов, т.е. дает отрицательный эффект. Критический индекс в перколяционной модели усиления нанокомпозитов является линейной спадающей функцией доли поверхности раздела фаз. Это означает неоднозначную зависимость степени усиления от содержания нанонаполнителя, что открывает широкие возможности улучшения эксплуатационных характеристик нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки. Предложенная перколяционная трактовка принципиально отличается от микромеханических моделей, поскольку она не оперирует такими традиционными для последних показателями, как модули упругости матричного полимера и нанонаполнителя, а также аспектным отношением для анизотропных нанонаполнителей.

Список литературы

1. Moniruzzaman M., Winey K. I. Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes // Macromolecules. 2006. Vol. 39, N. 16. P. 5194–5205.
2. Zare Y., Garmabi H. Analysis of tensile modulus of PP/nanoclay/CaCO₃ ternary nanocomposite using composite theories // J. Appl. Polymer Sci. 2012. Vol. 123, N. 8. P. 2309–2319.
3. Coleman N. J., Cadek M., Ryan K. P., Fonseca A., Nady J. B., Blau W. J., Ferreira M. S. Reinforcement of polymers with carbon nanotubes. The role of an ordered polymer interfacial region. Experiment and modeling // Polymer. 2006. Vol. 47, N. 23. P. 8556–8561.
4. Schaefer D. W., Justice R. S. How nano are nanocomposites? // Macromolecules. 2007. Vol. 40, N. 24. P. 8501–8517.
5. Стенли Х. Фрактальные поверхности и модель "термита" для двухкомпонентных случайных материалов // Фракталь в физике / Ред. Пьетронеро Л., Тозатти Э. М.: Мир, 1988. С. 463–477.
6. Микитаев А. К., Козлов Г. В. Описание степени усиления нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки в рамках перколяционных моделей // Физика твердого тела. 2015. Т. 57, № 5. С. 961–964.
7. Микитаев А. К., Козлов Г. В. Перколяционная модель усиления нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки // Физика и механика материалов. 2015. Т. 22, № 2. С. 101–106.
8. Козлов Г. В., Долбин И. В. Влияние реального уровня анизотропии углеродных нанотрубок на степень усиления полимерных нанокомпозитов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60, № 6. С. 72–76.
9. Микитаев А. К., Козлов Г. В. Зависимость степени усиления нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки от размерности нанонаполнителя // Доклады АН. 2015. Т. 462, № 1. С. 41–44.
10. Микитаев А. К., Козлов Г. В. Моделирование углеродных нанотрубок (нановолокон) как макромолекулярных клубков // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 8. С. 3–7.
11. Микитаев А. К., Козлов Г. В. Моделирование углеродных нанотрубок как макромолекулярных клубков в нанокомпозитах со стеклообразной полимерной матрицей // Физика и химия стекла. 2016. Т. 42, № 2. С. 250–256.
12. Андреевский Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы // Российский химический журнал. 2002. Т. 46, № 5. С. 50–56.
13. Микитаев А. К., Козлов Г. В. Роль поверхностей раздела фаз в формировании свойств полимерных нанокомпозитов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 2. С. 96–99.
14. Yanovsky Yu. G., Kozlov G. V., Zhirkova Z. M., Aloev V. Z., Karnet Yu. N. Special features of the structure of carbon nanotubes in polymer composite media // Nanomechanics Sci. Techn. 2012. Vol. 3, N. 2. P. 99–124.
15. Микитаев А. К., Козлов Г. В., Заиков Г. Е. Полимерные нанокомпозиты: многообразие структурных форм и приложений. М.: Наука, 2009. 278 с.
16. Микитаев А. К., Козлов Г. В. Структурная модель усиления нанокомпозитов полиметилметакрилат/углеродные нанотрубки при ультрамалых содержаниях нанонаполнителя // Журнал технической физики. 2016. Т. 86, № 10. С. 99–103.
17. Nelyub V. A., Borodulin A. S., Kobets L. P., Malyshova G. V. A study of structure formation in a binder depending on the surface microrelief of carbon fiber // Polymer Sci., Series D. 2016. Vol. 9, N. 3. P. 286–289.
18. Mikitaev A. K., Kozlov G. V. The effect of interaction between carbon nanotubes (nanofibers) on interphase adhesion in polymeric nanocomposites // Polymer Sci., Series D. 2016. Vol. 9, N. 1. P. 110–113.

G. V. Kozlov, Senior Researcher, i_dolbin@mail.ru, **I. V. Dolbin**, Ph. D., Associate Professor, Kh. M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, 360000, Russian Federation

Corresponding author:

Dolbin Igor V., Associate Professor, Kh. M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, 360000, Russian Federation, e-mail: i_dolbin@mail.ru

Influence of the Nanofiller Interactions on the Reinforcement Degree of the Nanocomposites of the Polymer/Carbon Nanotubes

Received on November 07, 2017

Accepted on December 12, 2017

The authors demonstrate that the main parameter, which determines the properties of the polymer nanocomposites and other nanomaterials is the fraction of the division surfaces of the polymer matrix — nanofiller. Within the framework of the percolation theory of reinforcement the above fraction determines the critical index and, hence, the degree of reinforcement of the nanocomposites. An important role is played by the type of interactions of particles (aggregates of particles) of the nanofiller.

Keywords: nanocomposite, carbon nanotubes, division surfaces, interaction, percolation, reinforcement degree

For citation:

Kozlov G. V., Dolbin I. V. Influence of the Nanofiller Interactions on the Reinforcement Degree of the Nanocomposites of the Polymer/Carbon Nanotubes, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 259–266.

DOI: 10.17587/nmst.20.259-266

Introduction

In recent 25 years great attention has been devoted to the research of the polymeric nanocomposites, which is reflected in a sharp increase of the publications on this subject [1]. In this period numerous nanocomposites with nanofillers of different classes, using most varied polymers as matrixes, were developed. However, in the practical aspect and theoretical interpretation of the above nanomaterials a big imbalance is quite obvious. For a quantitative description of the properties of the nanocomposites the rule of mixtures of its different modifications is mainly used, as well as its derivative micromechanical models [2], which have a number of inherent drawbacks. Firstly, they employ the properties of the components of the nanocomposites (matrix polymer and nanofiller), instead of the structural characteristics. Secondly, they apply the initial characteristics of the specified components, which for the nanocomposites can differ essentially from the real characteristics of the same components in a polymer nanocomposite, which is due to the two effects typical for these nanomaterials: aggregation of the initial particles of the nanofiller and formation of the interphase areas. So, the authors of the article [3] proposed a procedure for calculation of the module of elasticity of the specified components of E_{ag} and E_{if} , accordingly, and discovered, that for the nanocomposites of the polyvinyl alcohol/carbon nanotubes $E_{ag} = 71 \pm 55$ GPa and $E_{if} = 46 \pm 5.5$ GPa at the rated values of the moduli of elasticity of the carbon nanotubes ~1000 GPa and of the matrix polymer ~2 GPa. Thus, the micromechanical models use not the real, but the fictitious values of the specified parameters. The same conclusion can be drawn in case of the anisotropic nanofillers (carbon nanotubes, organoclay, graphene, etc.) and their aspect relations [4].

The specified drawbacks of the micromechanical models resulted in development of new theoretical approaches using an essentially different basis. Firstly, the interpretation of the polymeric nanocomposites as random mixtures allows us to use the percolation models for their description [5]. These models have been successfully applied for description of the properties of the nanocomposites of the polymer/carbon nanotubes [6–8]. Secondly, for the carbon nanotubes a specific kind of aggregation is formation of the ring-shaped structures by them [4], which is due to a high aspect relation and low transverse stiffness of this nanofiller. This circumstance allows us to model the above mentioned ring-shaped structures as the macromolecular coils [9–11]. And, thirdly, the decisive role of the numerous phase division surfaces in the nanomaterials in general as a base for an essential change of the properties of the solid bodies is of a fundamental importance [12]. This principle is also correct for of the polymer nanocomposites [13]. Proceeding from the above, the aim of the present work is description of the degree of reinforcement of the nanocomposites of the polypropylene/carbon nanotubes (nanofibers) on the basis of the three principles specified above.

Experiment

The role of the matrix polymer was played by commercially available Kaplen polypropylene (PP) of 01 030 brand with the average molecular weight of $(2...3) \cdot 10^3$ and poly-

dispersity index of 4.5. As the nanofiller the carbon nanotubes (CNT) of Taunit brand were used with the external diameter of 20–70 nm, internal diameter of 5–10 nm and length over 2 micrometers. Besides, the multilayered nanofibers (CNF) were used with the number of the layers of 20...30, diameter 20...30 nm and length over 2 micrometers. The mass content of both types of the nanofillers varied within the limits of 0.15...3.0 % of weight.

PP/CNT and PP/CNF nanocomposites were obtained by mixing of components in Thermo Haake two-screw extruder of Reomex RTW 25/42 model, (Germany). Mixing was done at temperatures of 463...503 K and the screw rotation speeds of 50 min⁻¹ during 5 minutes. The test samples were obtained by the die cast method on Test Sample Molding Apparatus RR/TS MP from Ray-Ran Co. (Taiwan) at 483 K and pressure of 43 MPa.

The mechanical tests for a uniaxial tension were done on the samples in the form of a two-sided shovel with the sizes in accordance with GOST 112 62–80 standard, on T-TCS 2000 universal testing machine, manufactured in Germany, at 293 K and speeds of strain of $\sim 2 \times 10^{-3}$ s⁻¹.

Results and discussion

In a polymeric matrix of nanocomposite the carbon nanotubes (nanofibers) form ring-shaped structures, the radius R_{CNT} of which can be defined by means of the following correlation [14]:

$$(2R_{\text{CNT}})^3 = \frac{\pi L_{\text{CNT}} r_{\text{CNT}}^2}{\varphi_n}, \quad (1)$$

where L_{CNT} and r_{CNT} — length and radius of a carbon nanotube, accordingly; φ_n — volume content of the nanofiller, which can be estimated according to the following formula [15]:

$$\varphi_n = \frac{W_n}{\rho_n},$$

where W_n — mass content of the nanofiller, ρ_n — its density defined in the following way [15]:

$$\rho_n = 188(2r_{\text{CNT}})^{1/3}, \text{ kg/m}^3,$$

where r_{CNT} is given in nanometers.

As is shown in [12], the relative fraction of the phase division surfaces φ_{sd} is estimated according to the following correlation:

$$\varphi_{sd} = \frac{3s}{L}, \quad (2)$$

where s — width of the border region, L — size of a grain in the nanomaterials.

With reference to the considered nanocomposites the correlation (2) can be presented in the following way:

$$\varphi_{np} = \frac{3l_{if}}{R_{\text{CNT}}},$$

where l_{if} — thickness of the interphase layer.

The value of l_{if} is defined by means of the following formula [14]:

$$\varphi_{if} = \varphi_n \left[\left(\frac{r_{\text{CNT}} + l_{if}}{r_{\text{CNT}}} \right)^3 - 1 \right],$$

where φ_{if} — relative fraction of the interphase regions, which is calculated with the help of the following percolation correlation [14]:

$$\frac{E_n}{E_m} = 1 + 11(\varphi_n + \varphi_{if})^{1.7},$$

where E_n and E_m — elasticity moduli of the nanocomposite and matrix polymer, accordingly (the correlation of E_n/E_m is usually called a degree of reinforcement of a nanocomposite).

And, at last, within the framework of the percolation model of reinforcement of the nanocomposites the value of E_n/E_m is presented in the following way [6, 7]:

$$\frac{E_n}{E_m} = 1 + 11(\varphi_n)^a, \quad (3)$$

where a — percolation index, close to the standard percolation indexes of β , v and t .

The affinity of index a to this or that standard percolation index reflects the type of the reinforcing component of a nanocomposite. So, at $a \approx \beta \approx 0.40$ a nanocomposite is reinforced by the interphase regions (true nanocomposites), at $a \approx v \approx 0.80$ — by the aggregate of the nanofiller and the interphase regions, and at $a \approx t \approx 1.60$ — only by the nanofiller or filler (microcomposites). Thus, introduction of the initial nano-sized particles into the matrix does not guarantee a nanocomposite in the long run [6].

Fig. 1 presents the dependence of index a on the fraction of the phase division surfaces of $\varphi_{sd} = (3l_{if}/R_{\text{CNT}})$ for the nanocomposites of PP/CNT and PP/CNF. This dependence shows a linear recession a in the process of growth of $(3l_{if}/R_{\text{CNT}})$, which according to the equation (3) means an increase of E_n/E_m . The correlation between the parameters a and $(3l_{if}/R_{\text{CNT}})$ is described by the following equation:

$$a = 1.6 - 3.35(3l_{if}/R_{\text{CNT}}) \quad (4)$$

or

$$a = t - 3.35(3l_{if}/R_{\text{CNT}}). \quad (5)$$

The diagram allows us to draw a number of conclusions. Firstly, the considered nanostructured polymeric composites basically belong to the category of intermediate nanocomposites. Secondly, the true nanocomposites ($a \leq 0.40$) are realized at $(3l_{if}/R_{\text{CNT}}) > 0.37$, which is rather close to the estimation of $\varphi_{if} > 0.50$ made in [12]. And, thirdly, the equations (4) and (5) show, that a decrease in index a can be realized either in case l_{if} is increased or R_{CNT} is decreased.

The authors of the work [16] demonstrated the important role of interactions between the nanotubes for reinforcement of the nanocomposites of polymethylmethacrylate /functionalized multiwalled nanotubes. Within the framework of the micromechanical models [2] it was revealed, that appearance of the specified interaction leads to a change of the category of these nanomaterials from true nanocomposites to the intermediate ones. It is possible to estimate the interactions between the ring-shaped formations within the framework of their modeling as the macromolecular coils [4]. The fractal

dimension D_f of the specified formations is defined by means of the following equation [9]:

$$R_{\text{CNT}} = 3.4 \varphi_n^{-1/(d-D_f)},$$

where d — dimension of the Euclidean space, in which the fractal is considered (in our case, obviously, $d = 3$).

The interactions between the ring-shaped formations of the carbon nanotubes within the framework of the specified analogy are determined by parameter ε connected with dimension D_f by equation [16]

$$D_f = \frac{2}{\varepsilon + 1}. \quad (6)$$

Since variation D_f equals to 1...3 [6], then, according to equation (6) we get variation $\varepsilon = 1...-1/3$. In case $D_f = 2.0$, that is, analogy with the macromolecular coil in an ideal θ solvent, $\varepsilon = 0$ and interactions between the ring-shaped formation are absent. In case D_f is less than 2.0, the values of ε are positive, which corresponds to the interactions of repulsion, while, if $D_f > 2.0$ the values of ε are negative, which corresponds to the interactions of attraction [16].

Fig. 2 presents the dependencies of the fraction of the phase division surfaces $\varphi_{if} = (3l_{if}/R_{\text{CNT}})$ on parameter ε for the considered nanocomposites. These dependencies are divided into two linear sections with the boundary value of $\varepsilon = 0$. In case of the positive values of ε , that is, the interactions of repulsion between the ring-shaped formations, the value $(3l_{if}/R_{\text{CNT}})$ does not depend on ε and is constant: $(3l_{if}/R_{\text{CNT}}) = \text{const} \approx 0.268$ for the nanocomposites PP/CNT and $(3l_{if}/R_{\text{CNT}}) = \text{const} \approx 0.192$ for PP/CNF. It is obvious, that according to the equations (4) and (5), in this case index a is a constant value equal to ~ 0.70 for PP/CNT and ~ 0.96 for PP/CNF. It is possible to assume, that the constant values of $(3l_{if}/R_{\text{CNT}})$ at $\varepsilon > 0$ are the characteristics of quality of a nanocomposite, because exactly they define the minimal value of a (see fig. 1) and, hence, the maximal possible achievable value of E_n/E_m at the fixed value of φ_n .

Fig. 3 presents a comparison of the calculated according to equations (3) and (4) and received experimentally dependences of the degree of reinforcement of E_n/E_m on the mass content of nanofiller W_n for the considered nanocomposites. As it follows from this comparison, we have a good conformity of the theory and the experiment — their average divergence is $\sim 2.5\%$, which even less than the experiment error during determination of parameter E_n/E_m .

And in conclusion we will consider the reasons for variation of the gradient of dE_n/dW_n at the content of CNT (CNF) of $\sim 1\%$ of weight for the considered nanocomposites. As is shown in [6], for the nanocomposites of the polymer/carbon nanotubes there are three critical points for the structure of the nanofiller in a polymeric matrix. The first such critical point on the scale of concentrations is the percolation threshold of the carbon nanotubes φ_c , which is most simply defined as follows [6]:

$$\varphi_c = 0.6 \left(\frac{2r_{\text{CNT}}}{L_{\text{CNT}}} \right). \quad (7)$$

Equation (7) gives the following values of the percolation threshold of the carbon nanotubes (nanofibers): for PP/CNT nanocomposites — $\varphi_c = 0.90\%$ of weight and $\varphi_c = 0.69\%$ of weight — for PP/CNF. The second critical point is the

threshold of the aggregate stability of the nanofiller φ_n^{ag} , above which its aggregation begins. The value of φ_n^{ag} was found in accordance with equation [16–18]:

$$\varphi_n^{ag} = \frac{\gamma k T}{\sigma_m a_{str}^2}, \quad (8)$$

where $\gamma \approx 10$ — dimensionless constant, k — Boltzmann constant, T — absolute temperature, σ_m — surface energy, a_{str} — size of a structural unit.

As T the temperature for obtaining of the considered nanocomposites was taken ($T = 463$ K), $\sigma_m = 0.10$ J/m² [16] and $a_{str} = 2r_{CNT}$. During the use of the specified parameters of estimation, according to the equation (8), $\varphi_n^{ag} = 0.96$ % of weight for the nanocomposites of PP/CNT and $\varphi_n^{ag} = 1.35$ % of weight for PP/CNF.

And, finally, the third critical point is the content of the nanofiller φ_n^{cr} , at which it forms "closed" ring-shaped formations with the radius of R_{CNT}^{cr} [6]:

$$R_{CNT}^{cr} = \frac{L_{CNT}}{2\pi}. \quad (9)$$

Having found the value of R_{CNT}^{cr} in accordance with equation (9), we can calculate the value of φ_n^{cr} by means of correlation (1). The value of φ_n^{cr} turns out to be equal to 0.80 % of weight for the nanocomposites PP/CNT and PP/CNF. Hence, all the specified critical structural points of the nanofiller in the polymeric matrix are within a rather narrow range of its concentrations, namely, 0.80...1.35 % of weight, which is shown in fig. 3 as the shaded area. As one can see, this area on the scale of concentrations of the nanofiller agree well with the concentration, at which $d(E_n/E_m)/dW_n$ gradient changes. This circumstance allows us to assume, that the above mentioned three critical structural points of the nanofiller have identical physical significance and are realized practically simultaneously.

Conclusion

Thus, the results of the present work demonstrated, that in the nanocomposites of the polymer/carbon nanotubes (nanofibers) the major factor of variation of their properties is the relative fraction of the phase division surfaces, just like for all the nanomaterials in general. In the presence of interactions of repulsion between the ring-shaped formations of the carbon nanotubes the specified fraction is constant and maximal, which makes it possible to use it as the base characteristic of a nanocomposite. Appearance of the interactions of attraction leads to a sharp decrease of the fraction of the phase division surfaces, which, in the long run, determines a decrease in the degree of reinforcement of the nanocomposites, i.e. gives a negative effect. The critical index in the percolation model of reinforcement of the nanocomposites is a linear falling function of the fraction of the phase division surfaces. This means an ambiguous dependence of the degree of reinforcement on the content of the nanofiller, which opens ample opportunities for improvement of the operational characteristics of the nanocomposites of the polymer/carbon nanotubes. The proposed percolation interpretation differs essentially from the micromechanical models, because it does not operate with such characteristics, traditional for latter, as the moduli of elasticity of the matrix polymer and nanofiller, and also the ratio for the anisotropic nanofillers.

References

1. Moniruzzaman M., Winey K. I. Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes, *Macromolecules*, 2006, vol. 39, no. 16, pp. 5194–5205.
2. Zare Y., Garmabi H. Analysis of tensile modulus of PP/nanoclay/CaCO₃ ternary nanocomposite using composite theories, *J. Appl. Polymer Sci.*, 2012, vol. 123, no. 8, pp. 2309–2319.
3. Coleman N. J., Cadek M., Ryan K. P., Fonseca A., Nady J. B., Blau W. J., Ferreira M. S. Reinforcement of polymers with carbon nanotubes. The role of an ordered polymer interfacial region. Experiment and modeling, *Polymer*, 2006, vol. 47, no. 23, pp. 8556–8561.
4. Schaefer D. W., Justice R. S. How nano are nanocomposites? *Macromolecules*, 2007, vol. 40, no. 24, pp. 8501–8517.
5. Stanley H. E. Fraktal'nye poverkhnosti i model' "termite" dlya dvukhkomponentnykh sluchainykh materialov. V knige: *Fraktały v fizike*. Red. P'etronero L., Tozatti E. M. Moscow, Mir, 1988, pp. 463–477 (in Russian).
6. Mikitaev A. K., Kozlov G. V. Opisanie stepeni usileniya nanokompozitov polimer/uglerodnye nanotrubki v ramkakh perkolatlionnykh modelei. *Fizika tverdogo tela*, 2015, vol. 57, no. 5, p. 961–964 (in Russian).
7. Mikitaev A. K., Kozlov G. V. Perkolatlionnaya model usileniya nanokompozitov polimer/uglerodnye nanotrubki, *Fizika i mehanika materialov*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 101–106 (in Russian).
8. Kozlov G. V., Dolbin I. V. Vliyanie real'nogo urovnya anizotropii uglerodnykh nanotrubok na stepen' usileniya polimernykh nanomaterialov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, Fizika*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 72–76 (in Russian).
9. Mikitaev A. K., Kozlov G. V. Zavisimost' stepeni usileniya nanokompozitov polimer/uglerodnye nanotrubki ot razmernosti nanonapolnitelya, *Doklady Akademii Nauk*, 2015, vol. 462, no. 1, pp. 41–44 (in Russian).
10. Mikitaev A. K., Kozlov G. V. Modelirovaniye uglerodnykh nanotrubok (nanovolokon) kak makromolekulyarnykh klubkov, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, Fizika*, 2015, vol. 58, no. 8, pp. 3–7 (in Russian).
11. Mikitaev A. K., Kozlov G. V. Modelirovaniye uglerodnykh nanotrubok kak makromolekulyarnykh klubkov v nanokompozitakh so stekloobraznoi polimernoii matritsei, *Fizika i khimiya stekla*, 2016, vol. 42, no. 2, pp. 250–256 (in Russian).
12. Andrievskii R. A. Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennye problemy, *Rossiiskii khimicheskii Zhurnal*, 2002, vol. 46, no. 5, pp. 50–56 (in Russian).
13. Mikitaev A. K., Kozlov G. V. Rol' poverkhnosti razdela faz v formirovaniyu svoistv polimernykh nanokompozitov, *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*, 2016, no. 2, pp. 96–99 (in Russian).
14. Yanovsky Yu. G., Kozlov G. V., Zhirikova Z. M., Aloev V. Z., Karnet Yu. N. Special features of the structure of carbon nanotubes in polymer composite media, *Nanomechanics Sci. Techn.*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 99–124.
15. Mikitaev A. K., Kozlov G. V., Zaikov G. E. *Polymernye nanokompozity: mnogoobrazie strukturnykh form i prilozhenii*. Moscow, Nauka, 2009, 278 p. (in Russian).
16. Mikitaev A. K., Kozlov G. V. Strukturnaya model usileniya nanokompozitov polimetilmekatrilat/uglerodnye nanotrubki pri ul'tramalykh soderzhaniyah nanonapolnitelya, *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2016, vol. 86, no. 10, pp. 99–103 (in Russian).
17. Nelyub V. A., Borodulin A. S., Kobets L. P., Malysheva G. V. A study of structure formation in a binder depending on the surface microrelief of carbon fiber, *Polymer Sci. — Series D*, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 286–289.
18. Mikitaev A. K., Kozlov G. V. The effect of interaction between carbon nanotubes (nanofibers) on interphase adhesion in polymeric nanocomposites, *Polymer Sci. — Series D*, 2016, vol. 9, no. 1, pp. 110–113.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.31

DOI: 10.17587/nmst.20.267-276

А. А. Герасин, канд. экон. наук., гл. инженер, ФГУП "ГосНИИАС", **Ф. Р. Исмагилов**, д-р техн. наук., зав. каф., проф., e-mail: s2_88@mail.ru, **В. Е. Вавилов**, канд. техн. наук., ст. преподаватель, e-mail: s2_88@mail.ru, **А. М. Веселов**, магистрант, e-mail: veselov.a.m@yandex.ru, **А. Х. Минияров**, аспирант, инженер, e-mail: zi.zd@mail.ru, **В. В. Айгузина**, аспирант, e-mail: vtipy@mail.ru,
Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ И ИСПЫТАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МИКРОБЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Поступила в редакцию 11.10.2017

Представлена новая топология высокооборотного магнитоэлектрического генератора с магнитопроводом из аморфного железа для микробеспилотных летательных аппаратов, определенная с помощью предложенной последовательности проектирования. Для подтверждения теоретических выводов был создан полноразмерный экспериментальный макет мощностью 5 кВт с частотой вращения ротора 60 000 об/мин, плотностью мощности 0,2 кг/кВт и КПД 96,4 %. Применение аморфного железа позволило снизить потери в магнитопроводе статора в 5–7 раз.

Ключевые слова: высокоскоростная магнитоэлектрическая машина, микробеспилотный летательный аппарат, аморфное железо, зубцовая обмотка

Введение

Перспективным направлением развития аэрокосмической техники является создание и разработка микробеспилотных летательных аппаратов (микроБЛА) [1]. Для создания перспективных БЛА с турбореактивным двигателем (ТРД) требуется высокоэффективные стартер-генераторы (СГ), имеющие максимальную плотность энергии и максимальный коэффициент полезного действия [2]. Помимо микроБЛА с турбореактивным двигателем, задачи создания высокоэффективных СГ стоят и в микроБЛА на электрической тяге. Главным направлением их развития является применение гибридных схем, где СГ является основным источником энергии и во многом определяет возможности микроБЛА, время полета и его скоростные характеристики [3–5].

Наиболее эффективно требования, предъявляемые к СГ микроБЛА, могут быть реализованы с помощью высокооборотных магнитоэлектрических генераторов (МЭГ) с зубцовой обмоткой (МЭГЗО) [2]. Преимуществами МЭГЗО являются отсутствие необходимости подачи энергии для возбуждения,

минимальные габаритные размеры лобового вылета благодаря применению зубцовой обмотки и, соответственно, снижение длины ротора ТРД, что положительно сказывается на всей роторной динамике ТРД.

В проектируемом СГ частота вращения ротора ТРД составляла 60 000 об/мин, что обусловлено характеристиками ТРД. Ограниченностю мощности МЭГ на уровне 5 кВт современных микроБЛА вызвана ограниченностью мощности и объема ТРД, так как именно от вала ТРД отбирается механическая мощность для выработки МЭГ электрической энергии. Объемом ТРД определяются практически все размеры микроБЛА [6–8].

Увеличение плотности мощности СГ позволяет уменьшить его объем и увеличить объем ТРД при неизменных размерах микроБЛА. Это обеспечит увеличение времени полета микроБЛА, его скорости и полезной нагрузки, поэтому задача увеличения плотности мощности СГ является важной и во многом определяющей тактико-технические характеристики микроБЛА.

В МЭГ предлагается использовать магнитопровод статора из аморфного железа и зубцовую

обмотку. Аморфное железо позволяет минимизировать потери в стали в 5–7 раз по сравнению с кремниевыми или кобальтовыми сплавами [9–11]. Зубцовая обмотка используется для достижения минимальных габаритных размеров, а это приведет к появлению в МЭГ пространственных гармоник магнитодвижущей силы (МДС) и наведению в постоянных магнитах вихревых токов. Для минимизации этих потерь на вихревые токи в постоянных магнитах была решена задача многокритериальной оптимизации пазовой зоны МЭГ. В результате потери в постоянных магнитах снизились в 2–2,5 раза.

1. Проектирование и оптимизация предлагаемой топологии

Основной новизной и трудностью при реализации МЭГЗО является использование аморфного железа, поэтому был выбран следующий алгоритм проектирования МЭГЗО.

Шаг 1. Определение числа пазов статора. Схема охлаждения МЭГЗО и число пазов — фиксированные. Выбор материалов ротора, предварительные электромагнитные расчеты для возможных вариантов числа полюсов ротора. Расчеты обмоточных данных и механические расчеты ротора. Сравнение рассмотренных топологий и определение оптимального числа пар полюсов ротора.

Шаг 2. Анализ роторной динамики МЭГЗО совместно с валом ТРД. В случае неудовлетворительных результатов повторяется шаг 1 и выбираются новые геометрические размеры ротора. При удовлетворительных результатах проектирование продолжается.

Шаг 3. Оптимизация пазовой зоны МЭГЗО и размеров пазового ферромагнитного клина по критерию минимальных потерь с помощью генетических алгоритмов, реализованных в коммерческих программных продуктах.

Шаг 4. Тепловые расчеты МЭГЗО. В случае неудовлетворительных результатов выполняется корректировка на шаге 3 или, если позволяют технологические возможности, оптимизация системы охлаждения. При удовлетворительных результатах создается макетный образец.

Предлагаемый алгоритм отличается от известных методологий проектирования МЭГ [12–14] выбором и фиксацией числа пазов, а также системой охлаждения и отсутствием ограничений на число полюсов. Эти отличия обусловлены технологическими особенностями использования аморфного железа. Обычно в высокооборотных электрических машинах используется одна пара полюсов для минимизации потерь в железе статора. Но при использовании аморфного железа, у которого и так очень низкие удельные потери, можно использовать большее число полюсов, которое огра-

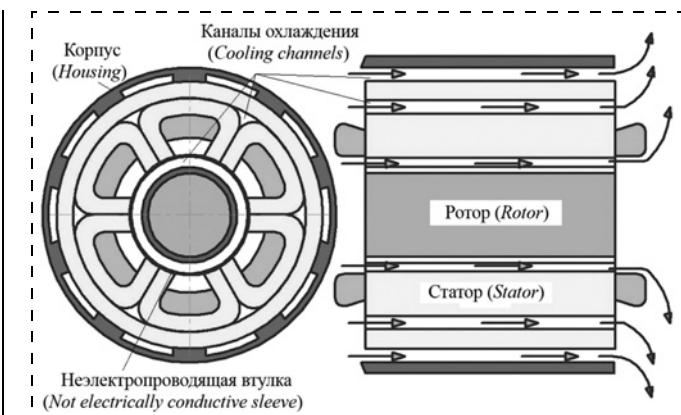


Рис. 2. Система охлаждения МЭГЗО

Fig. 2. Cooling system for TCMEG

ничивается числом пазов статора, т.е. возможностью реализации схемы обмотки для определенного числа пазов на полюс и фазу. В остальных моментах алгоритм схож со следующей устоявшейся последовательностью расчетов [12–14].

Шаг 1. Для использования аморфного железа в статоре МЭГЗО предлагается следующий подход: из ленты аморфного железа формируются несколько магнитопроводов треугольной формы. Число треугольных магнитопроводов соответствует числу пазов статора МЭГЗО. Важно отметить, что в целях экономических издержек при производстве желательно, чтобы число данных пазов было минимальным.

На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) приведены магнитопроводы из аморфного железа для проектируемого МЭГЗО, одно из важных преимуществ которых — технологические воздушные каналы для охлаждения МЭГЗО (рис. 2), расположенные в теле статора, что значительно улучшает теплоотвод от активной зоны МЭГЗО. Воздух движется по трем путям: в теле статора, по воздушному зазору и по поверхности статора. При отказе от внешнего кольца (см. рис. 1, а) СГ будет иметь всего два канала охлаждения. Для минимизации аэродинамических потерь в зазоре между статором и ротором была установлена керамическая втулка.

Статор был выполнен из аморфного железа марки 5БДСР с индукцией насыщения 1,35 Тл и удельными потерями не более 5 Вт/кг при частоте 1000 Гц и индукции 1,25 Тл.

Обмотка МЭГЗО — зубовая из многожильного провода. Изоляция провода — полиимидная с температурным индексом 220 °C. Для минимизации гармоник МДС использован ферромагнитный пазовый клин.

Рассматривали две конструктивные схемы статора: магнитопровод из ленты и магнитопровод из нескольких сердечников. Очевидно, что первый магнитопровод более прост в изготовлении, а второй имеет более низкие потери на вихревые токи и

гистерезис. Геометрические размеры магнитопровода статора выбирали так, чтобы индукция в зубцах и спинке была одинаковой. В этом случае удельные потери в зубцах и спинке будут одинаковыми, а полные потери в железе статора будут зависеть от массы зубцов и спинки. В МЭГЗО с распределенной обмоткой и магнитопроводом из электротехнической стали сложно достичь одинаковой массы зубцов и спинки, поэтому распределение потерь по магнитопроводу статора в них практически всегда неравномерно. Для двухполюсного МЭГЗО со штампованным магнитопроводом потери в спинке статора больше потерь в зубцах. В предлагаемом МЭГЗО спинка статора формируется отдельно от зубцов, что позволяет достичнуть приблизительно одинаковой массы спинки и зубцов (разница не более 20–30 %), поэтому распределение потерь в железе статора практически равномерно.

С учетом геометрических размеров статора были рассчитаны размеры ротора. Марка постоянного магнита марки — *SmCo* ($B_r = 1,07$ Тл; $H_c = 756$ кА/м). Для обеспечения механической прочности ротора поверх магнитов была установлена втулка из углепластикового волокна, которая имеет достаточную механическую прочность и обеспечивает минимальные потери на вихревые токи в бандажной оболочке.

На стадии предварительных расчетов рассматривали четырехполюсную и двухполюсную топологии. Обычно в высокооборотных электрических машинах используется одна пара полюсов для минимизации потерь в железе статора. Но так как применяется аморфное железо с очень низкими удельными потерями, в топологии можно использовать и большое число полюсов, которое в данном случае ограничивается числом пазов статора. В табл. 1 приведены результаты расчетов четырехполюсной и двухполюсной топологии МЭГЗО.

Из табл. 1 видно, что четырехполюсная магнитная система позволяет достичь более низких массогабаритных показателей МЭГЗО за счет отказа от внешнего кольца магнитопровода из аморфного железа. Индукция в магнитопроводе статора в четырехполюсной магнитной системе — 1,2 Тл, потери в постоянных магнитах — $3 \cdot 10^8$ Вт/м³. На этапе оптимизации были рассмотрены варианты выполнения ротора из нескольких постоянных магнитов, расположенных друг за другом в осевом направлении. При равном выходном напряжении в топологиях число витков, плотность тока и потери в обмотке меньше в четырехполюсной системе. При этом значительные недостатки такой системы — высокая частота перемагничивания статора (2000 Гц) и обусловленные этим потери в магнитопроводе на вихревые токи и гистерезис.

При двухполюсной магнитной системе частота перемагничивания статора составляет 1000 Гц, а индукция в магнитопроводе статора — 1,5 Тл, т.е. выше индукции насыщения сплава 5БДСР. Потери в постоянных магнитах на вихревые токи и гистерезис составляют $2,1 \cdot 10^8$ Вт/м³, что на 30 % меньше, чем в четырехполюсной магнитной системе.

Очевидно, что увеличение частоты перемагничивания между двухполюсной и четырехполюсной магнитной системами в 2 раза приведет к увеличению потерь на вихревые токи в четырехполюсной МЭГЗО в первом приближении в 4 раза. Но масса магнитопровода двухполюсного МЭГЗО выше в 2 раза, индукция выше на 20 %, а потери определяются массой магнитопровода, магнитной индукцией и частотой. Поэтому итоговые потери у четырехполюсного ротора будут всего в 1,5 раза больше двухполюсного.

Так как используется аморфное железо, потери в статоре при частоте 2000 Гц и индукции 1,2 Тл в четырехполюсной топологии не будут превышать 7 Вт, а в двухполюсной — 4,6 Вт. Далее этот вывод

Таблица 1
Table 1
Параметры МЭГЗО по предварительным расчетам
Parameters of TCMEG by preliminary calculations

Параметры <i>Options</i>	Двухполюсная система <i>Two-pole system</i>	Четырехполюсная система <i>Four-pole system</i>
Мощность, кВт <i>Power, kW</i>	5	5
Частота вращения ротора, об/мин <i>Rotor speed, rpm</i>	60 000	60 000
Действующее фазное напряжение, В <i>Effective phase voltage, V</i>	115	115
Тип материала <i>Material type</i>	5БДСР, толщина 25 мкм <i>5BDSR, thickness 25 μm</i>	5БДСР, толщина 25 мкм <i>5BDSR, thickness 25 μm</i>
Индукция насыщения, Тл <i>Saturation induction, T</i>	1,35	1,35
Тип постоянных маг- нитов, $B_r(T)/H_c$ (кА/м) <i>Type of permanent mag- nets, $B_r(T)/H_c$(kA/m)</i>	SmCo, 1,07/756	SmCo, 1,07/756
Материал бандажной оболочки <i>Material of the shroud</i>	Карбон <i>Carbon</i>	Карбон <i>Carbon</i>
Предел прочности ма- териала бандажной оболочки, МПа <i>Strength of the material of the shroud, MPa</i>	1500	1500
Масса активных частей, кг <i>Mass of active parts, kg</i>	1	0,8
Хладагент <i>Refrigerant</i>	Воздух <i>Air</i>	Воздух <i>Air</i>

будет доказан экспериментально. С учетом того что потери в обмотке у четырехполюсной топологии ниже (22 Вт при 62,5 Вт у двухполюсной), при реализации МЭГЗО была выбрана четырехполюсная топология. Итоговые потери в магнитопроводе статора в данной топологии равны 29 Вт, а для двухполюсной — более 60 Вт.

Этот результат отличает представленную работу от известных [12–14], где рекомендуется выбор двухполюсной магнитной системы. Эти отличия проявляются благодаря использованию аморфного железа. Ввиду недостатков четырехполюсной топологии, чтобы получить действительно эффективный продукт, после расчета критических частот ротора была оптимизирована пазовая зона и выбрана эффективная толщина сектора постоянного магнита по критерию минимума потерь.

Шаг 2. После определения числа пар полюсов, а также геометрических размеров активной части МЭГЗО анализировали динамику ротора. Так как МЭГЗО интегрирован в ТРД, то динамику его ротора необходимо рассматривать совместно с динамикой ротора ТРД. Иначе, просчитав только динамику ротора самой электрической машины, появляется риск разрушения при установке на вал ТРД. Эта особенность касается всех интегрированных электрических машин. В результате установлено, что третья критическая частота имеет место при скорости выше на 117 % от номинальной. На частотах, близких к 60 000 об/мин, критических частот не наблюдается. Результаты анализа роторной

динамики считались положительными, что позволяет перейти к следующему шагу.

Шаг 3. Оптимизация пазовой зоны и определение потерь. Пазовая зона МЭГЗО оптимизировалась по критерию минимума потерь на вихревые токи в постоянных магнитах за счет ферромагнитного клина из материала *Magnova* 2067. Размеры паза должны оставаться неизменными ввиду технологических ограничений при формировании магнитопровода из аморфного железа. При неизменных размерах паза использование ферромагнитного клина приведет к увеличению потерь в обмотке и увеличению плотности тока. Поэтому была проведена многокритериальная оптимизация с помощью генетических алгоритмов в программном комплексе *Ansys Maxwell*. С использованием метода Парето определена оптимальная высота ферромагнитного клина, при которой потери в постоянных магнитах на вихревые токи снижаются в 1,75 раза, а плотность тока и потери в меди увеличиваются на 20 %. Оптимизация позволила снизить потери в постоянных магнитах на вихревые токи в 4 раза. После этого были рассчитаны полные потери во всех элементах МЭГЗО (табл. 2). Потери в подшипниковых узлах не учитывали, так как МЭГЗО интегрирован в ТРД и не имеет собственных подшипниковых узлов.

Таким образом, получен проект МЭГЗО для микробЛА с частотой вращения 60 000 об/мин, плотностью энергии 0,2 кг/кВт при КПД 96,4 %.

Таблица 2
Table 2

Потери МЭГЗО
TCMEG Losses

Тип потерь <i>Type</i>	Зависимость, характеризующая потери <i>Dependence characterizing the losses</i>	Значение величины <i>Value</i>
Аэродинамические потери <i>Aerodynamic losses</i>	$P_{air} = \frac{c_f \rho_{air} \Omega^3 D_b^4 l}{16}$	$P_{air} = 125 \text{ Вт}$ $P_{air} = 125 \text{ Вт}$
Потери в обмотке <i>Losses in the winding</i>	$P_{cu} = m I^2 R$	$P_{cu} = 27 \text{ Вт}$ $P_{cu} = 27 \text{ Вт}$
Потери в магнитопроводе статора <i>Losses in the stator magnetic core</i>	Удельные потери в аморфном железе при частоте 2000 Гц и индукции 1,2 Тл составляют 35 Вт/кг <i>Specific losses in amorphous iron at a frequency of 2000 Hz and induction of 1.2 T are 35 W/kg</i>	$P_c = 7 \text{ Вт}$ $P_c = 7 \text{ Вт}$
Потери в бандажной оболочке ротора и постоянных магнитах на вихревые токи <i>Losses in the shroud of the rotor and permanent magnets on eddy currents</i>	Определяется компьютерным моделированием в программном комплексе <i>Ansys Maxwell</i> <i>It is determined by computer modeling in the software complex Ansys Maxwell</i>	$P_p = 12 \text{ Вт}$ $P_p = 12 \text{ Вт}$
Добавочные потери <i>Additional losses</i>	Потери на вихревые токи и эффект близости в обмотке статора, потери от перемагничивания магнитопровода несинусоидальным магнитным потоком, дополнительные потери в лобовых частях <i>Losses on eddy currents and proximity effect in the stator winding, losses from magnetic reversal of the magnetic core by a non-sinusoidal magnetic flux, additional losses in the frontal parts</i>	$P_a = 15 \text{ Вт}$ $P_a = 15 \text{ Вт}$
Полный КПД <i>Full efficiency</i>	$\eta = \frac{P}{P + P_p + P_c + P_{cu} + P_{air} + P_a} \cdot 100 \%$	96,4 %

Шаг 4. Поверочные расчеты системы охлаждения МЭГЗО проводили для СГ совместно с ТРД. Охлаждение СГ предполагается осуществлять воздухом, отбираемым от импеллера, который затем сбрасывается в канал центрального стяжного болта. Поскольку система четырехполюсная, в ней отсутствует дополнительный канал охлаждения, формируемый спинкой статора. Воздух двигается только по двум путям: через зазор между статором и ротором, а также по спинке статора. Максимальная температура воздуха на входе в СГ принималась равной +50 °С. Скорость воздуха — 30 м/с. Температура постоянных магнитов не превышала 80 °С, обмотки — 130 °С, магнитопровода статора — 108 °С. Полученные значения температур не превышают установленных ограничений.

Результаты теплового расчета подтвердили работоспособность МЭГЗО. Все это позволило перейти к созданию и испытаниям макетных образцов МЭГЗО.

2. Экспериментальные макеты и их исследования

Для экспериментальных исследований было создано два полноразмерных экспериментальных макета МЭГЗО для двухполюсной и четырехполюсной систем. На рис. 3 (см. вторую сторону обложки) приведены экспериментальный макет четырехполюсного МЭГЗО в сборе и установка для испытаний. Испытания выполняли на пониженных частотах: 3000 об/мин для двухполюсной системы и 1500 об/мин для четырехполюсной. Две разные частоты вращения были использованы для обеспечения равенства частот напряжения обоих генераторов при сравнении. Результаты экспериментальных исследований отличаются от данных компьютерного моделирования не более чем на 3 %. При испытаниях были использованы подшипники SKF 638/8-2Z с частотой вращения до 90 000 об/мин.

Главной задачей при испытаниях макета была оценка его энергоэффективности и КПД путем прямых измерений, т.е. оценка потребляемой мощности привода (асинхронного двигателя) и выдаваемой мощности макета в генераторном режиме.

КПД в генераторном режиме оценивали для более точных измерений, а также для простой оценки аэродинамических потерь и потерь на трение в макете. Было изготовлено два ротора из одинаковых материалов с одинаковой обработкой поверхности. Один ротор был выполнен с постоянными магнитами, другой ротор — без них. При пуске привода макета с ротором с постоянными магнитами на холостом ходу потребляемая приводом мощность составляла 81,5 Вт, при пуске привода с муфтой без соединения с МЭГЗО потребляемая мощность была равна 60 Вт. На холостом ходу при генераторном режиме в созданном макете имеют место аэродинамические потери, потери в статоре на гистерезис

и вихревые токи, а также потери в подшипниковых опорах.

При измерении энергопотребления привода МЭГЗО с ротором без постоянных магнитов в качестве привода выступал асинхронный электродвигатель мощностью 1,5 кВт с частотой вращения ротора 2800 об/мин. Оценку энергопотребления асинхронного электродвигателя проводили с помощью анализатора мощности Призма—50. При пуске макета потребляемая мощность привода составила 80 Вт на фазу. В данном случае в МЭГЗО имели место только аэродинамические потери и потери в подшипниковых узлах, т.е. механические потери. Поэтому очевидно, что потери в магнитопроводе статора двухполюсной магнитной системы составляют 4,5 Вт. За 10 мин эксплуатации макета двухполюсного МЭГЗО магнитопровод при этом значении потерь нагрелся до 60 °С. С учетом массы магнитопровода удельные потери составили 11,25 Вт/кг, что является довольно большим значением для частоты 50 Гц. Поэтому был проведен ряд дополнительных исследований для выяснения столь значительного значения потерь.

Потери в магнитопроводе статора оценивали при определенном значении магнитной индукции в зубцах. Так как в разработанном макете обмотка зубцовая, то весь поток, проходящий через нее, будет потоком через зубец статора. Для оценки магнитной индукции в зубцах статора к выводам одной из катушек был подключен милливеберметр, и было установлено, что индукция в зубцах для двухполюсной системы составляет 1,5 Тл, для четырехполюсной — 1,22 Тл. Эти данные хорошо согласуются с данными компьютерного моделирования.

Причина полученного значения потерь в двухполюсной конструкции — значительное насыщение магнитопровода статора. Для аморфного железа 5БДСР индукция насыщения составляет 1,35 Тл. Оценка потерь при насыщенном магнитопроводе не допускается, так как в этом случае потери значительно возрастают по сравнению с нормальными условиями эксплуатации. Для четырехполюсной системы данные проблемы отсутствовали, что еще раз подтверждает правильность выбранного числа полюсов.

Действующее значение фазного напряжения в макете СГ составляет 4,39 В при частоте 50 Гц. При увеличении частоты в 40 раз фазное напряжение составит 118 В, что соответствует данным компьютерного моделирования. Масса макета с учетом подшипниковых щитов, корпуса и подшипников составила 1 кг, т.е. плотность мощности равна 0,2 кг/кВт. Поэтому следующим этапом была оценка потерь в магнитопроводе статора при высоких частотах перемагничивания и при значениях магнитной индукции ниже индукции насыщения. В магнитопровод был установлен 10-полюсный ротор. Магнит-

ная индукция в зазоре составила 0,4 Тл, а потери в магнитопроводе — 0,3 Вт/кг. За 10 мин эксплуатации температура статора изменилась на 0,8 °С, а температура зубцов статора — на 1 °С. Температуру спинки статора измеряли тепловизором Testo 870, температуру зубцов — установленной на их поверхности термопарой.

Полученное значение удельных потерь в железе в 5—7 раз меньше аналогичных значений для электротехнических сталей, т.е. результаты экспериментальных исследований подтверждают теоретические выводы. При этом выполнение статора из нескольких пакетов — наиболее эффективный вариант при реализации нашей технологии. Это позволит еще больше минимизировать потери. На данный момент совместно с индустриальным партнером была проработана технология изготовления такого статора, и при следующих исследованиях будет проведена апробация данной топологии.

Также на макете был поставлен опыт идеального короткого замыкания. В этом случае ток короткого замыкания для четырехполюсной системы составил 11,7 А при частоте 50 Гц, т. е. СГ даже при малых частотах вращения способен обеспечить двукратную перегрузку по току.

Таким образом, уже первоначальные экспериментальные исследования показали, что поставленная нами цель достигнута. Следующим этапом наших исследований будут испытания на полную частоту и полную мощность, а также испытания в составе микроБЛА.

Заключение

В работе представлена новая топология МЭГЗО с магнитопроводом из аморфного железа для перспективных микроБЛА. Предложена последовательность проектирования МЭГЗО с магнитопроводом из аморфного железа, согласно которой были проведены расчеты нескольких топологий МЭГЗО методами компьютерного моделирования и выбрано оптимальное число пар полюсов. Показано, что использование аморфного железа позволяет эффективно использовать в МЭГЗО больше одной пары полюсов и повысить плотность энергии. Для минимизации потерь в постоянных магнитах на вихревые токи проведена многокритериальная оптимизация пазовой зоны с помощью генетических алгоритмов. В результате потери в постоянных магнитах на вихревые токи были снижены в 4 раза.

Для верификации предложенной последовательности проектирования и оценки эффективности использования аморфного железа был создан полноразмерный экспериментальный макет мощностью 5 кВт, с частотой вращения ротора 60 000 об/мин, плотностью мощности 0,2 кг/кВт и КПД 96,4 %. Испытания макета подтвердили все теоретические выводы и показали, что применение

аморфного железа позволяет снизить потери в магнитопроводе статора в 5—7 раз.

Данные результаты используются при создании новых перспективных микроБЛА, а также будут использованы для МЭГ, применяемых в других промышленных приложениях. Следующим этапом исследований будет проведение полноценных испытаний макетных образцов на полную рабочую частоту и в составе микроБЛА.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 17-79-20027.

Список литературы

1. Larbi M., Meguenni K., Meddahi Y., Litim M. Nonlinear Observer and Backstepping Control of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle // International Review of Aerospace Engineering (IREASE). 2013. Vol. 6, N. 5, P. 233–242.
2. Yun J., Cho S., Cong Liu H., Lee H.-W., Lee J. Design of electromagnetic field of permanent magnet generator for VTOL series-hybrid UAV // 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2015. Pattaya City, Thailand, 2016, P. 83–86.
3. Secttnde R. R., Macosko R. P., Repas D. S. Integrate Engine—generator concept for aircraft electric secondary power national aeronautics and space administration // NASA/TM X 2579, Washington, D. C., June 1972. P. 22.
4. Nukki R., Kilk A., Kallaste A., Vaimann T., Tiimus Sr. K. Exterior-rotor permanent magnet synchronous machine with toroidal windings for unmanned aerial vehicles // 9th International: 2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, PQ 2014, Proceedings, 2014. P. 215–220.
5. Koo V. C., Chan Y. K., Gobi V. A new unmanned aerial vehicle synthetic aperture radar for environmental monitoring // Progress in Electromagnetics Research, 2012. Vol. 122. P. 245–268.
6. Borg Bartolo J., Degano M., Espina J., Gerada C. Design and Initial Testing of a High-Speed 45-kW Switched Reluctance Drive for Aerospace Application // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 64, N. 2. 7592921. P. 988–997.
7. Ganev E. High-Performance Electric Drives for Aerospace More Electric Architectures // IEEE Power Engineering Society Meeting. 2007. P. 1–8.
8. Ganev E. Selecting the Best Electric Machines for Electrical Power Generation Systems // IEEE Electrification Magazine. 2014. Vol. 2, N. 4. P. 13–22.
9. Wang Z., Enomoto Y., Ito M., Masaki R., Morinaga S., Itabashi H., Tanigawa S. Development of a permanent magnet motor utilizing amorphous wound cores // IEEE Trans. Magn. 2010. Vol. 46, N. 2. P. 570–573.
10. Wang Z., Enomoto Y., Ito M., Masaki R., Morinaga S., Itabashi H., Tanigawa S. Development of an axial gap motor with amorphous metal cores // IEEE Trans. Ind. Appl., 2011, Vol. 47, N. 3. P. 1293–1299.
11. Rührig M. Stator für eine elektrische Maschine und Verfahren zum Herstellen eines Stators für eine elektrische Maschine, Patent DE 102012207508 A1. Siemens Aktiengesellschaft. 07.05.2012.
12. Yakupov A., Ismagilov F., Khayrullin I., Vavilov V. Method of designing high-speed generators for the biogas plant// International Journal of Renewable Energy Research. 2016. Vol. 6, N. 2. P. 447–454.
13. Uzhegov N., Kurvinen E., Nerg J., Sopanen J. T., Shirinskii S. Multidisciplinary Design Process of a 6-Slot 2-Pole High-Speed Permanent-Magnet Synchronous Machine // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63, N. 2. P. 784–795.
14. Zwyssig C., Kolar J. W., Round S. D. Mega-Speed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million RPM. Mechatronics // IEEE/ASME Transactions. 2009, Vol. 14, N. 5. P. 564–574.

A. A. Gerasin, Ph. D., Chief Engineer, GosNIIAS, **F. R. Ismagilov**, Ph. D., Head of Department, Professor, e-mail: s2_88@mail.ru, **V. E. Vavilov**, Ph. D., Senior Lecturer, e-mail: s2_88@mail.ru,
A. M. Veselov, Graduate Student, Engineer, e-mail: veselov.a.m@yandex.ru,
A. Kh. Miniyarov, Graduate Student, Engineer, e-mail: zi.zd@mail.ru, **V. V. Ayguzina**, Engineer, e-mail: vtipy@mail.ru,
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

Corresponding author:

Ayguzina Valentina V., Engineer, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation.
E-mail: vtipy@mail.ru

Design, Optimization and Testing of High-Speed Magnetoelectric Generator for Power Supply of Micro-Unmanned Aerial Vehicles

Received on October 11, 2017

Accepted on November 01, 2017

This paper presents a new topology of a high-speed magnetoelectric generator with a stator magnetic core made of amorphous alloy for micro-unmanned aerial vehicles, which was determined by using the proposed design algorithm. It is shown that the use of amorphous alloys in the stator magnetic core makes it possible to efficiently use more than one pole pair in the high-speed magnetoelectric generator, and consequently, to increase its power density. To minimize the eddy-current losses in permanent magnets, the slot zone optimization was made by using the genetic algorithms. As a result, the eddy-current losses in permanent magnets were reduced by 300 % more. To confirm the theoretical conclusions, a full-sized 5 kW experimental model with a rotational speed of 60,000 rpm, a power density of 0.2 kg/kW and an efficiency of 96.4 % was created. The use of amorphous alloys made it possible to reduce losses in the stator magnetic core by 400–600 % more.

Keywords: high-speed magnetoelectric generator, micro-unmanned aerial vehicles, amorphous alloy, tooth-coiled winding

For citation:

Gerasin A. A., Ismagilov F. R., Vavilov V. E., Veselov A. M., Miniyarov A. Kh., Ayguzina V. V. Design, Optimization and Testing of High-Speed Magnetoelectric Generator for Power Supply of Micro-Unmanned Aerial Vehicles, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 267–276.

DOI: 10.17587/nmst.20.267-276

Introduction

A promising direction in the development of aerospace engineering is the development of micro uncrewed aerial vehicles (micro-UAV) [1]. To create a promising UAV with a turbojet engine (TJE), a high-efficiency starter generators (SG) are required that have the maximum energy density and maximum efficiency [2]. In addition to the micro-UAV with a turbojet engine, the tasks of creating of highly efficient SGs are also in micro-UAV on electric traction. The main direction of development is the use of hybrid circuits, where SG is the main source of energy, and largely determines the capabilities, flight time and speed characteristics of micro-UAV [3–5].

The most effective the requirements for micro-UAV's SGs can be realized with the aid of high-speed magnetoelectric generators (MEG) with a tooth coil (TCMEG) [2]. Advantages of the TCMEG are the absence of the need for power for excitation, the minimum dimensions of the frontal outreach due to the use of a tooth coil and, correspondingly, a decrease in the length of the TJE rotor, which has a positive effect on the entire rotor dynamics of the turbojet engine.

In the designed SG, the rotor speed of the turbojet engine was 60,000 rpm, which is due to the characteristics of the turbojet engine. The limited power of the MEG at 5 kW of modern micro-UAV is caused by the limited power and volume of the turbojet engine, since the TJE shaft gives the mechanical power for production of MEG electric energy. The vol-

ume of the turbojet engine determines almost all the dimensions of the micro-UAV [6–8].

Increasing the power density of the SG makes it possible to reduce its volume and increase the volume of turbojet engine with the same dimensions of the micro-UAV. This will ensure an increase in the micro-UAV flight time, its speed and payload, so the task of increasing of the power density of the SG is important and in many respects determines the tactical and technical characteristics of the micro-UAV.

In MEG, it is proposed to use a stator core made of amorphous iron and a toothed coil. Amorphous iron makes it possible to minimize losses in steel by 5–7 times in comparison with silicon or cobalt alloys [9–11]. The spiral winding is used to achieve the minimum dimensions, and this will lead to the appearance of the spatial harmonics of the MMF in MEG and the eddy currents in the permanent magnets. To minimize losses on eddy currents in permanent magnets, the issue of multicriteria optimization of the MEG slotted area is solved. As a result, losses in permanent magnets decreased by 2–2.5 times.

1. Design and optimization of the proposed topology

The main novelty and difficulty in the implementation of the TCMEG is the use of amorphous iron, so the following design algorithm for the TCMEG was chosen.

Step 1. Determination of a number of stator slots. The cooling scheme for TCMEG and the number of grooves are fixed. Selection of rotor materials, preliminary electromagnetic calculations for possible variants of the number of poles

of the rotor. Calculation of winding data and mechanical calculations of the rotor. Comparison of the considered topologies and determination of the optimal number of pairs of rotor poles.

Step 2. Analysis of the rotor dynamics of TCMEG together with the shaft of the turbojet engine. In case of unsatisfactory results, step 1 is repeated and new geometric dimensions of the rotor are selected. With satisfactory results, the design work continues.

Step 3. Optimization of the TCMEG slotted area and dimensions of the groove ferromagnetic wedge by the criterion of minimal losses using genetic algorithms implemented in commercial software products.

Step 4. Thermal calculations of TCMEG. In case of unsatisfactory results, the correction is performed in step 3 or, if the technological capabilities permit, the optimization of the cooling system. With satisfactory results, a prototype is created.

The proposed algorithm differs from the well-known MEG design methodologies [12–14] by selecting and fixing the number of grooves, as well as the cooling system and the absence of restrictions on the number of poles. These differences are due to technological features of the use of amorphous iron. Typically, high-speed electrical machines use one pair of poles to minimize losses in the stator iron. But when using amorphous iron, which already has very low specific losses, a larger number of poles can be used, which is limited by the number of stator slots, i.e. the possibility of implementing of a winding circuit for a certain number of slots per pole and phase. In other cases, the algorithm is similar to an established sequence of calculations [12–14].

Step 1. For the use of amorphous iron in TCMEG stator, the following approach is proposed: several triangular magnetic cores are formed from the amorphous iron strip. The number of triangular magnetic cores corresponds to the number of slots in the TCMEG stator. It is important to note that, for the sake of economic costs in production, it is desirable that the number of these grooves is minimal.

Fig. 1 (see the 2nd side of cover) shows the magnetic cores from amorphous iron for the projected TCMEG, one of the important advantages of which are technological air channels for TCMEG cooling (fig. 2) in the body of the stator, which significantly improves the heat removal from the TCMEG core. Air moves in three ways: in the body of the stator, along the air gap and over the surface of the stator. If the outer ring fails (fig. 1, a), the SG will have only 2 cooling channels. To minimize aerodynamic losses, a ceramic bushing is installed in the gap between the stator and the rotor.

The stator is made of amorphous iron 5BDSP with saturation induction of 1.35 T and specific losses of no more than 5 W/kg at a frequency of 1000 Hz and induction of 1.25 T.

TCMEG winding is a tooth-typed from the stranded wire. Wire insulation is made of polyimide with a temperature index of 220 °C. The ferromagnetic slotted wedge was used to minimize MDS harmonic distortion.

Two stator cores were considered: a magnetic core from a tape and a magnetic core from several cores. It is obvious that the first magnetic core is simpler to manufacture, and the second has lower losses for eddy currents and hysteresis. The geometric dimensions of the stator magnetic core were chosen so that the induction in the teeth and back was identical. In this case, the specific losses in the teeth and the back are the same, and the total losses in the stator iron depend on the

mass of teeth and back. In TCMEG with a distributed winding and a magnetic core of electrical steel it is difficult to achieve the same mass of teeth and back, so the distribution of losses along the stator magnetic core in them is almost always uneven. For a two-pole TCMEG with a stamped magnetic core, the losses in the stator back are greater than the losses in the teeth. In the proposed TCMEG, the stator back is formed separately from the teeth, which makes it possible to achieve approximately the same mass of the back and teeth (the difference is not more than 20–30 %). Therefore, the distribution of losses in the stator iron is almost uniform.

Taking into account the geometry of stator, the dimensions of the rotor are calculated. The brand of permanent magnet is *SmCo* ($B_r = 1.07$ T; $H_c = 756$ kA/m). To ensure the mechanical strength of the rotor, a carbon fiber bushing is installed over the magnets, which has sufficient mechanical strength and provides minimum losses for eddy currents in the shroud.

At the stage of preliminary calculations, the four-pole and two-pole topologies were considered. Typically, high-speed electrical machines use one pair of poles to minimize losses in the stator iron. But since amorphous iron is used with very low specific losses, a large number of poles can be used in topology, which in this case is limited by the number of stator slots. Tab. 1 shows the results of calculations of the four-pole and two-pole TCMEG topologies.

From Tab. 1 it can be seen that the four-pole magnetic system allows to achieve lower mass dimensions of TCMEG due to throwing out of the outer ring of the amorphous iron magnetic core. The induction in the stator magnetic core in the four-pole magnetic system is 1.2 T, the losses in permanent magnets are $3 \cdot 10^8$ W/m³. At the optimization stage, the embodiments of a rotor of several permanent magnets arranged one after another in the axial direction are considered. With equal output voltage in topologies, the number of turns, current density and losses in the winding are smaller in a four-pole system. At the same time, significant drawbacks of such a system are the high frequency of stator reversal magnetization (2000 Hz) and the resulting losses in the magnetic core for eddy currents and hysteresis.

With a bipolar magnetic system, the frequency of the stator reversal magnetization is 1000 Hz, and the induction in the stator magnetic core is 1.5 T, i.e. above the induction of saturation of the 5BDSP alloy. Losses in permanent magnets on eddy currents and hysteresis are $2.1 \cdot 10^8$ W/m³, which is 30 % less than in a four-pole magnetic system.

It is obvious that the double increase in the frequency of the reversal magnetization between the two-pole and four-pole magnetic systems will increase in the eddy current losses in the four-pole TCMEG in the first approximation by a factor of four. But the mass of the magnetic core of the two-pole TCMEG is twice higher, the induction is higher by 20 %, and the losses are determined by the mass of the magnetic core, magnetic induction, and frequency. Therefore, the total loss of a four-pole rotor will be only in 1.5 times more than that of a two-pole rotor.

Since the amorphous iron is used, losses in the stator at a frequency of 2000 Hz and induction of 1.2 T in the four-pole topology will not exceed 7 W, and in the bipolar topology — 4.6 W. This conclusion is further was proved experimentally. Taking into account that the losses in the winding for the four-pole topology are lower (22 W at 62.5 W in a bipolar), a four-pole topology was chosen in the implementation of

TCMEG. The total losses in the stator magnetic flux in this topology are 29 W, and for the bipolar — more than 60 W.

This result distinguishes the presented work from the known [12–14], where the selection of a bipolar magnetic system is recommended. This difference is due to the use of amorphous iron. In view of the shortcomings of the four-pole topology, in order to obtain a truly effective product, after calculating the critical rotor frequencies, the groove zone was optimized and the effective thickness of the permanent magnet sector was selected by the criterion of minimum losses.

Step 2. After determining the number of pairs of poles, as well as the geometric dimensions of the active part of TCMEG, the dynamics of the rotor was analyzed. Since the TCMEG is integrated into the turbojet engine, the dynamics of its rotor must be considered together with the dynamics of the turbojet rotor. Otherwise, after calculating only the dynamics of the rotor of only the electric machine itself, there is a risk of destruction when installed on the TRD shaft. This feature applies to all integrated electrical machines. As a result, it was found that the 3 critical frequency occurs at a speed higher by 117 % of the nominal. At frequencies close to 60,000 rpm, there are no critical frequencies. The results of the analysis of the rotor dynamics were considered positive, which allows us to proceed to the next step.

Step 3. Optimization of the slotted zone and determination of the losses. The TCMEG slotted area was optimized by the criterion of minimum loss of eddy currents in permanent magnets due to the ferromagnetic wedge from the *Magnoval 2067* material. The groove dimensions should remain unchanged due to technological limitations in the formation of an amorphous iron core. With the same size of the groove, the use of a ferromagnetic wedge will lead to an increase in losses in the winding and an increase in the current density. Therefore, multi-criteria optimization was carried out using genetic algorithms in the software complex *Ansys Maxwell*. Using the Pareto method, the optimum height of a ferromagnetic wedge is determined, at which the losses in permanent magnets in eddy currents decrease by 1.75 times, and the current density and losses in copper increase by 20 %. Optimization made it possible to reduce losses in permanent magnets by eddy currents by 4 times. After that, the total losses in all elements of TCMEG were calculated (see Tab. 2). Losses in the bearing units were not taken into account, since TCMEG is integrated into the turbojet engine and does not have its own bearing units.

Thus, the TCMEG project for a micro-UAV with a rotational speed of 60 000 rpm, an energy density of 0.2 kg/kW with an efficiency of 96.4 % was obtained.

Step 4. Calibration calculations of the cooling system of TCMEG were carried out for the SG together with the turbojet engine. Cooling of SG is supposed to be carried out by air, taken from the impeller, which is then discharged into the channel of the central coupling bolt. Since the system is four-pole, there is no additional cooling channel formed by the stator back. The air moves only along two paths: through the gap between the stator and the rotor, and also along the stator back. The maximum air temperature at the entrance to SG was assumed to be +50 °C. The air speed is 30 m/s. The temperature of permanent magnets did not exceed 80 °C, windings — 130 °C, stator magnetic core — 108 °C. The obtained temperature values do not exceed the established limits.

The results of the thermal calculation confirmed the operability of TCMEG. All this allowed to proceed to the creation and testing of TCMEG prototypes.

2. Experimental models and their studies

For experimental research, two full-size experimental TCMEG models for two-pole and four-pole systems were created. Fig. 3 (see the 2nd side of cover) shows the experimental model of the four-pole TCMEG assembly and the installation for testing. The tests were performed at reduced frequencies: 3000 rpm for the bipolar system and 1500 rpm for the four-pole system. Two different rotational speeds were used to ensure that the voltage frequencies of both generators were equal when compared. The results of experimental studies differ from computer simulation data by no more than 3 %. The bearings SKF 638/8-2Z with a speed of up to 90,000 rpm were used in tests.

The main task in testing of the layout was to assess its energy efficiency and efficiency by direct measurements, i.e. estimating the power consumption of the drive (asynchronous motor) and the output power of the model in the generator mode.

The efficiency in the generator mode was evaluated for more accurate measurements, as well as for a simple estimation of aerodynamic losses and friction losses in the layout. Two rotors were made from the same materials with the same surface treatment. One rotor was made with permanent magnets, another rotor — without them. When starting the drive of the model with the rotor with permanent magnets, the power consumed by the drive was 81.5 W at idle speed, when the drive was started with a coupling, without connection to the TCMEG, the power consumption was 60 W. At idling under the generator mode, only the aerodynamic losses occur in the created layout, stator losses due to hysteresis and eddy currents, as well as losses in bearing bearings.

When measuring the energy consumption of TCMEG drive with a rotor without permanent magnets, an asynchronous electric motor with a power of 1.5 kW with a rotor speed of 2800 rpm was acting as a drive. The energy consumption of the induction motor was estimated using a Prism-50 power analyzer. When starting the model, the drive's power consumption was 80 W per phase. In this case, only the aerodynamic losses and losses in the bearing assemblies (i.e. mechanical losses) took place in the TCMEG. Therefore, it is obvious that the losses in the stator magnetic core of the bipolar magnetic system are 4.5 W. For 10 minutes of operation of the model of the two-pole TCMEG, the magnetic core at this loss value was heated to 60 °C. Taking into account the mass of the magnetic core, the specific losses amounted to 11.25 W/kg, which is rather large value for the frequency of 50 Hz. Therefore, a number of additional studies were carried out to elucidate such a significant value of losses.

The losses in the stator magnetic core were estimated at a certain value of the magnetic induction in the teeth. Since in the designed layout the winding is tooth-typed, all the flow through it will flow through the stator tooth. To estimate the magnetic induction in the stator teeth, one millimeter was connected to the terminals of one of the coils and found that the induction in the teeth for the bipolar system is 1.5 T, for the four-pole system it is 1.22 T. These data are in good agreement with computer simulation data.

The reason for this loss in the bipolar structure is a significant saturation of the stator magnetic core. For amorphous iron, 5BDSP, the induction of saturation is 1.35 T. Estimation of losses with a saturated magnetic core is not allowed, since in this case the losses significantly increase in

comparison with normal operating conditions. For the four-pole system, these problems were not present, which again confirms the correctness of the chosen number of poles.

The effective value of the phase voltage in the SG layout is 4.39 V at a frequency of 50 Hz. With an increase in frequency of 40 times the phase voltage will be 118 V, which corresponds to the data of computer simulation. The weight of the model taking into account the bearing shields, shell and bearings was 1 kg, i.e. the power density is 0.2 kg/kW.

Therefore, the next step was to estimate the losses in the stator magnetic core at high magnetization frequencies and at magnetic induction values below saturation induction. A 10-pole rotor was installed in the magnetic core. The magnetic induction in the gap was 0.4 T, and the loss in the magnetic core was 0.3 W/kg. For 10 minutes of operation, the stator temperature has changed by 0.8 °C, and the temperature of the stator teeth — by 1 °C. The temperature of the stator back was measured with a thermal imager Testo 870, the temperature of the teeth — by the thermocouple installed on their surface.

The obtained value of specific losses in iron is 5–7 times less than the analogous values for electrical steel, i.e. the results of experimental studies confirm theoretical conclusions. At the same time, the stator of several packages is the most effective option when implementing our technology. This will further minimize the losses. At the moment, in cooperation with an industrial partner, the technology for manufacturing of such a stator has been worked out and, under the following researches, an approbation of this topology will be carried out.

Also the experience of an ideal short circuit was put on the model. In this case, the short-circuit current for the four-pole system was 11.7 A at a frequency of 50 Hz, that is the SG is capable of double current overload, even at low rotational speeds.

Thus, the initial experimental studies have already shown that our goal has been achieved. The next stage of our research will be tests for full frequency and full power, as well as tests as part of the micro-UAV.

Results and conclusions

The work presents a new topology of TCMEG with a magnetic cores made of amorphous iron for promising micro-UAVs. A sequence of TCMEG designing with a magnetic core from amorphous iron was proposed, according to which the calculations were made for several topologies of TCMEG by computer simulation methods and the optimal number of pole pairs was chosen. It is shown that the use of amorphous iron makes it possible to efficiently use more than one pair of poles in TCMEG and increases the energy density. To minimize the losses in permanent magnets for eddy currents, the multiobjective optimization of the slotted zone with the aid of genetic algorithms was made. As a result, the losses in permanent magnets for eddy currents were reduced by a factor of 4.

To verify the proposed design sequence and evaluate the efficiency of using of amorphous iron, a full-size 5 kW experimental model with a rotational speed of 60,000 rpm, a power density of 0.2 kg/kW and an efficiency of 96.4 % was created. The tests of the model confirmed all theoretical conclusions and showed that the use of amorphous iron makes it possible to reduce losses in the stator magnetic core by 5–7 times.

These results are used in the creation of new promising micro-UAVs, and will also be used for MEGs used in other industrial applications. The next stage of the research will be full-fledged testing of prototypes for the full operating frequency and as part of the micro-UAV.

The work was supported by the Russian Science Foundation, project 17-79-20027.

References

1. Larbi M., Meguenni K., Meddahi Y., Litim M. Nonlinear Observer and Backstepping Control of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle, *International Review of Aerospace Engineering (IREASE)*, 2013, vol. 6, no. 5, pp. 233–242.
2. Yun J., Cho S., Cong Liu H., Lee H.-W., Lee J. Design of electromagnetic field of permanent magnet generator for VTOL series-hybrid UAV, Proc. of 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2015. 2016, pp. 83–86.
3. Sectnde R. R., Macosko R. P., Repas D. S. Integrate Engine-generator concept for aircraft electric secondary power national aeronautics and space administration, *NASA/TM X 2579*, Washington, D. C., June 1972, pp. 22.
4. Nukki R., Kilk A., Kallaste A., Vaimann T., Tiimus Sr. K. Exterior-rotor permanent magnet synchronous machine with toroidal windings for unmanned aerial vehicles, *9th International: 2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, PQ 2014, Proceedings*, 2014, pp. 215–220.
5. Koo V. C., Chan Y. K., Gobi V. A new unmanned aerial vehicle synthetic aperture radar for environmental monitoring, *Progress in Electromagnetics Research*, 2012, vol. 122, pp. 245–268.
6. Borg Bartolo J., Degano M., Espina J., Gerada C. Design and Initial Testing of a High-Speed 45-kW Switched Reluctance Drive for Aerospace Application, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 64, no. 2, 7592921, pp. 988–997.
7. Ganev E. High-Performance Electric Drives for Aerospace More Electric Architectures, *IEEE Power Engineering Society Meeting*, 2007, pp. 1–8.
8. Ganev E. Selecting the Best Electric Machines for Electrical Power Generation Systems, *IEEE Electrification Magazine*, 2014, vol. 2, no. 4, pp. 13–22.
9. Wang Z., Enomoto Y., Ito M., Masaki R., Morinaga S., Itabashi H., Tanigawa S. Development of a permanent magnet motor utilizing amorphous wound cores, *IEEE Trans. Magn.*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 570–573.
10. Wang Z., Enomoto Y., Ito M., Masaki R., Morinaga S., Itabashi H., Tanigawa S. Development of an axial gap motor with amorphous metal cores, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 1293–1299.
11. Patent DE 102012207508 A1. Stator für eine elektrische Maschine und Verfahren zum Herstellen eines Stators für eine elektrische Maschine / Manfred Rührig, Siemens Aktiengesellschaft. 07.05.2012.
12. Yakupov A., Ismagilov F., Khayrullin I., Vavilov V. Method of designing high-speed generators for the biogas plant, *International Journal of Renewable Energy Research*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 447–454.
13. Uzhegov N., Kurvinen E., Nerg J., Sopanen J. T., Shirinskii S. Multidisciplinary Design Process of a 6-Slot 2-Pole High-Speed Permanent-Magnet Synchronous Machine, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63, no. 2, pp. 784–795.
14. Zwyssig C., Kolar J. W., Round S. D. Mega-Speed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million RPM. Mechatronics, *IEEE/ASME Transactions*, 2009, vol. 14, no. 5, pp. 564–574.

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

УДК 621.382, 544.72

DOI: 10.17587/nmst.20.277-286

С. В. Степьора, канд. физ.-мат. наук, доц., e-mail: stetsyurasv@mail.ru; **П. Г. Харитонова**, аспирант,
e-mail: haritonovapg@gmail.com,

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОФАЗНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ СУЛЬФИДА КАДМИЯ С ДОБАВЛЕНИЕМ СУЛЬФИДА СВИНЦА

Поступила в редакцию 04.10.2017

Проведен сравнительный анализ морфологии, поверхностного потенциала и характеристических времен пленок CdS и CdS-PbS, полученных с преобладанием широкозонного компонента CdS, методами гидрохимического осаждения (ГХО) и термического испарения в вакууме (ТИВ). Показано, что у образцов, полученных методом ГХО, времена релаксации сигнала в килогерцовом диапазоне частот на порядок меньше, а потенциальные барьеры на границах фаз CdS и PbS более выражены, чем у образцов, полученных методом ТИВ. Это делает метод ГХО перспективным для получения радиационно-стойких фоточувствительных материалов.

Ключевые слова: гетерофазные полупроводниковые пленки, сульфид кадмия, сульфид свинца, гидрохимическое осаждение, термическое испарение

Введение

Полупроводниковые твердые растворы с регулируемым составом и с возможностью изменения физических, фотоэлектрических и оптических свойств в широком диапазоне представляют интерес в качестве фоточувствительных и люминесцентных материалов электронной и оптоэлектронной техники. В последние десятилетия активно исследуются возможности использования твердых растворов на основе AlPbVI как в качестве пленочных планарных структур [1, 2], так и в виде квантово-размерных объектов [3, 4]. Так, например, композиты и твердые растворы на основе халькогенидов кадмия, в частности на основе сульфида кадмия (CdS с шириной запрещенной зоны 2,4 эВ), позволяют создавать гетеропереходы, на которых происходит эффективное разделение носителей заряда, увеличение времени жизни неравновесных носителей заряда [5], повышение интенсивности фотolumинесцентных процессов и т.п. Материалы на основе CdS успешно применяют в различных областях современной техники, в частности при изготовлении высокоэффективных и дешевых солнечных элементов, основанных на гетеропереходах [6–9].

Введение в состав материала ограниченно растворимых компонентов может приводить к созданию гетерофазного материала с гетеропереходами междуnano- и микроразмерными фазами, которые, в свою очередь, могут сильно изменять свойства и расширять область применения материала. Так, CdS и PbS (сульфид свинца с шириной запрещенной зоны 0,37...0,41 эВ) образуют ряд взаимно ограниченных твердых растворов, причем CdS растворяется в PbS до 4 мол. % при 600 °C и до 31,5 моль. % при 1000 °C, а PbS растворяется в CdS даже при 1070 °C только до 0,6 мол. %. Известно, что добавление в состав CdS сульфида свинца в количествах, превышающих предел растворимости, приводит к образованию гетерофазных радиационно-стойких структур [10]. Это происходит благодаря тому, что в широкозонном CdS образуются узкозонные пропицитаты (фазы) на основе PbS, являющиеся гетерами радиационных точечных дефектов. При изучении гетерофазных пленочных образцов, полученных на основе ограниченных твердых растворов CdS в PbS и PbS в CdS (кратко — CdS-PbS), обнаруживают также новые оптоэлектронные и оптоионные эффекты [11–13], расширяющие область применения этого гетерофазного материала.

Таким образом, изучение технологических режимов и исследование поликристаллических слоев, полученных на основе ограниченных твердых растворов CdS-PbS, представляют собой актуальную задачу, поскольку позволяют существенно уменьшить проявление таких недостатков соединений A₂BVI, как быстрая фотоутомляемость, малое быстродействие [10, 14], деградация под влиянием внешних воздействий [15], и позволяют получить новые функциональные возможности материала.

Как правило, гетерофазные системы на основе указанных компонентов получают одним из достаточно дешевых и воспроизводимых методов, к которым относятся, в первую очередь, гидрохимическое осаждение (ГХО) [16, 17] и термическое испарение в вакууме (ТИВ) [10, 18]. Соотношение компонентов CdS и PbS при изготовлении материала зависит от того, в какой области спектра предполагается использовать полученный фоточувствительный материал. В видимом диапазоне получили распространение материалы с соотношением компонентов CdS и PbS в исходной шихте 9:1 [19], в инфракрасной области — 3:7 [20]. Необходимо отметить, что фотоэлектрические свойства тонких пленок, полученных методом ТИВ, изучены в большей степени [10, 14, 21–23], так как пленочные структуры, получаемые этим методом, имеют высокую воспроизводимость электрофизических параметров. При этом метод ГХО по сравнению с другими тонкопленочными технологиями отличается высокой производительностью, экономичностью, простотой технологического оформления, возможностью нанесения пленок на поверхности большой площади, сложной формы и различной природы, высокой адгезией пленки к подложке, а также возможностью легирования слоя органическими ионами или молекулами, не допускающими высокотемпературного нагрева. К недостаткам метода ГХО относят, в первую очередь, нестабильность параметров образцов некоторое время после изготовления и ухудшение фоточувствительности пленок с течением времени [24]. Во многом благодаря этим причинам методом ГХО получали в основном твердые растворы с преобладанием узконного компонента PbS для использования материала в инфракрасном диапазоне, в котором эти недостатки были менее выражены. Поскольку растворимость CdS в PbS достаточно высокая, то добавление в исходную шихту малого количества CdS, как правило, не приводило к созданию гетерофазного материала, а способствовало лишь плавной коррекции параметров решетки и свойств пленки на основе PbS.

В представленной работе проведен сравнительный анализ морфологии, поверхностного потенциала и характеристических времен пленок CdS и CdS-PbS, полученных с преобладанием широко-

зонного компонента CdS методами гидрохимического осаждения и термического испарения в вакууме, и сделаны выводы о перспективах применения того или иного метода.

1. Объекты исследования и технология синтеза

В работе были исследованы поликристаллические гетерофазные пленки CdS-PbS при весовом соотношении CdS и PbS в исходной шихте 9:1 и пленки, исходная шихта которых содержала "чистый" CdS.

Для синтеза по методу ТИВ использовали порошкообразную шихту из CdS и PbS полупроводникового класса чистоты. В качестве активатора в шихту добавляли CuCl₂ в количестве до 0,1 вес. %. Пленки получали в однотиглевом режиме испарения при поддержании вакуума 10⁻⁵ мм рт. ст. Использовали стеклянные подложки при температуре 80...100 °C, температура резистивного испарителя составляла 780 °C, причем во избежание неконтролируемых выбросов вещества выведение на температуру сублимации происходило в несколько этапов в течение часа. В результате получались пленки с нанокристаллической структурой, практически нечувствительные к освещению. Сенсибилизацию проводили отжигом на воздухе при температуре 545 ± 5 °C в течение 15 мин. Толщина полученных пленок колебалась от 1 до 1,3 мкм.

Для синтеза методом ГХО гетерофазных пленок CdS-PbS использовали водный раствор с концентрацией 0,025 моль/л смеси следующих компонентов: свинец азотокислый Pb(NO₃)₂ — 0,269 г, хлористый кадмий CdCl₂ — 1,002 г и тиомочевина (NH₂)₂CS — 0,475 г. В результате гидролиза (NH₂)₂CS в растворе появляются сульфид-ионы и начинается образование и осаждение сульфидов кадмия и свинца. Для получения гомогенного образца на основе только CdS азотокислый свинец не добавляли.

2. Методика измерений и результаты исследований

Исследование поверхности методами сканирующей микроскопии. Для исследования полученных образцов использовали методы, которые позволяют охарактеризовать морфологию поверхности (атомно-силовая микроскопия — ACM) и потенциальный рельеф поверхности (сканирующая микроскопия зонда Кельвина — СМЗК). ACM- и СМЗК-измерения проводили с помощью зондовой нанолаборатории "NTEGRA-Spectra" (NT-MDT, Россия). Сканирование осуществлялось с частотой 0,3...0,5 Гц в полуконтактном режиме на воздухе с помощью кантилевера NSG11 с золотым напылением. Для анализа полученных данных использо-

вали программное обеспечение Gwyddion 2.31.

Результаты измерений морфологии методом ACM представлены в виде типичных участков поверхности исследуемых структур, полученных методом ГХО (рис. 1) и методом ТИВ (рис. 2). На рис. 3 показаны профили рельефа поверхности вдоль линий на соответствующих изображениях ACM, что позволяет визуально оценить изменение степени изрезанности (шероховатости) поверхности образцов при добавлении PbS в состав исходной шихты.

Распределения поверхностного потенциала для исследуемых образцов CdS и CdS-PbS, полученных с помощью различных технологий, представлены на рис. 4. Наличие микрометровых участков с пониженным поверхностным потенциалом за счет образования зерен PbS дает возможность оценить напряженность электрического поля и энергетический барьер на границах узкозонной и широкозонной фаз.

Исследование характеристических времен по частотным характеристикам. Измерение частотных характеристик емкости C проводили на зондовой станции Cascade Microtech PM5 в комплексе с прибором Agilent Technologies B1500A. Интервал изменения частоты f составил 1 кГц...1 МГц при амплитуде переменного напряжения 50 мВ. По зависимости $C(f)$ на рис. 5 были определены времена релаксации τ сигнала в соответствии с формулой

$$\tau = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1^2 - C_2^2}{(C_2 f_2)^2 - (C_1 f_1)^2}}, \quad (1)$$

где C_1 и C_2 — значения емкости на частотах f_1 и f_2 в Гц соответственно. Значение частоты f_1 выбирали произвольно, а значение f_2 — таким образом, чтобы значение емкости на этой частоте было в 0,7 раза меньше, чем при f_1 . На рис. 5 не показана высокочастотная часть $C(f)$ характеристики,

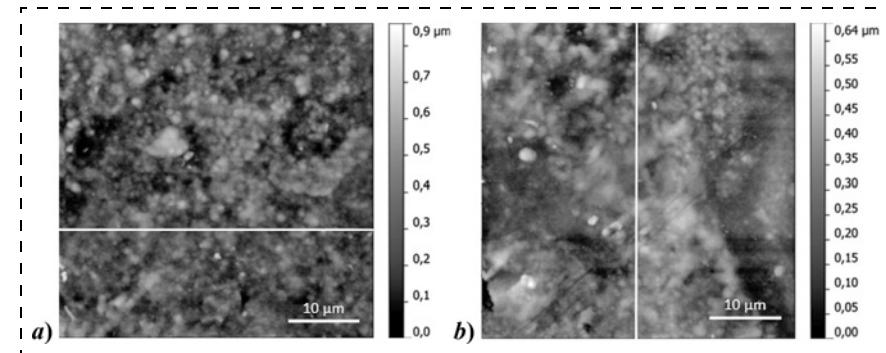


Рис. 1. ACM-изображения поверхности образцов, полученных методом ГХО: *a* — CdS; *b* — CdS-PbS

Fig. 1. AFM images of the surface of the samples obtained by the HCD method: *a* — CdS; *b* — CdS-PbS

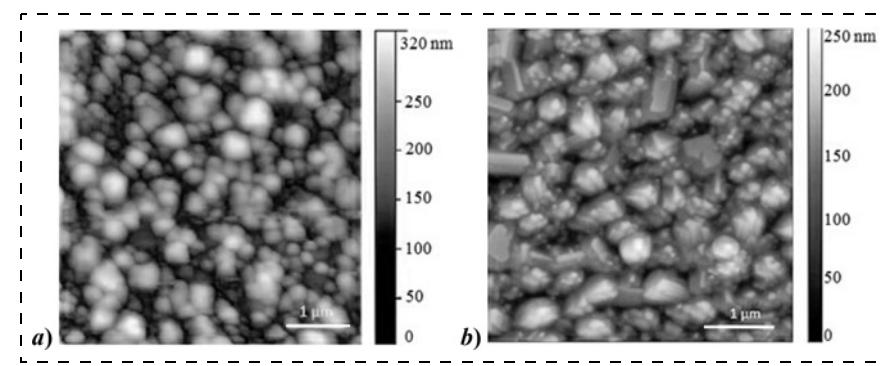


Рис. 2. ACM-изображения поверхности образцов, полученных методом ТИВ: *a* — CdS; *b* — CdS-PbS

Fig. 2. AFM images of the surface of the samples obtained by the TEV method: *a* — CdS; *b* — CdS-PbS

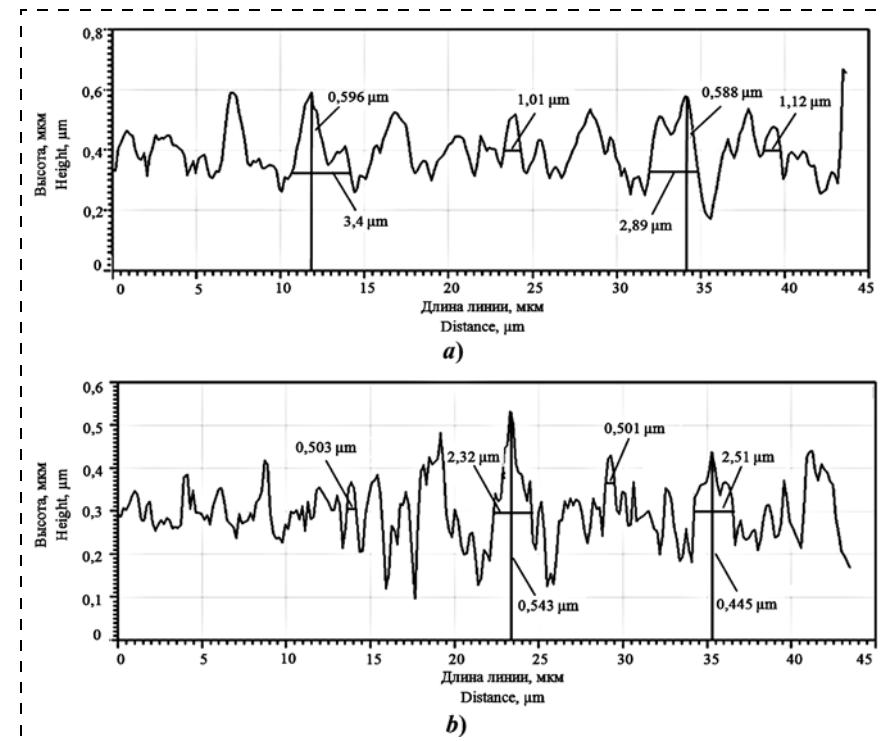


Рис. 3. Профиль рельефа поверхности вдоль линий на рис. 1, *a* и *b*, соответственно

Fig. 3. Profile of the surface relief along the lines in fig. 1, *a* and *b*, respectively

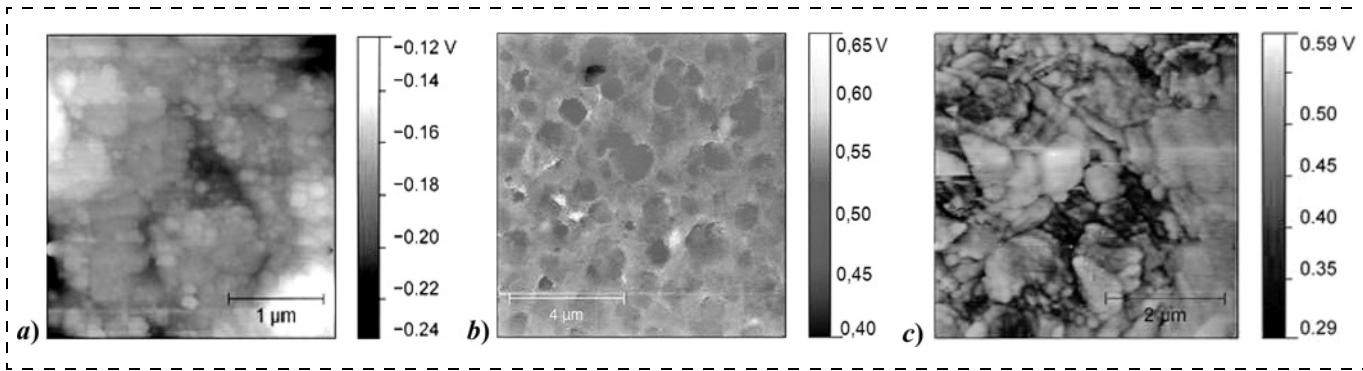


Рис. 4. Распределение поверхностного потенциала гомогенной пленки CdS (метод ТИВ) (а), гетерофазных пленок CdS-PbS, полученных методом ТИВ (б) и ГХО (в)

Fig. 4. Distribution of the surface potential of the homogeneous CdS film (TEV method) (a), the heterogeneous CdS-PbS films obtained by the TEV method (b), and by the HCD method (c)

так как при частотах выше 25 кГц изменения емкости не наблюдали.

3. Анализ результатов исследований

Анализ рис. 1—3 показывает, что у образцов, полученных методом ТИВ, покрытие более однородное, не наблюдается больших скоплений (неоднородностей) на поверхности, что характерно для образцов, полученных методом ГХО.

Обработка АСМ-изображений, проведенная с помощью программы Gwyddion 2.31, показала, что средняя арифметическая шероховатость образцов CdS вне зависимости от способа получения находится в диапазоне 50...52 нм, но при этом максимальная высота неровностей у образцов, полученных методом ГХО, в 2 раза превышала значение этого параметра у образцов, полученных методом ТИВ (см. рис. 1 и 2). Для образцов с узкозонным компонентом шероховатость поверхности и максимальная высота неровностей рельефа уменьшилась на 20...30 % по сравнению с образцами без

PbS вне зависимости от метода получения. Это связано с тем, что образующиеся преципитаты PbS сдерживают рост кристаллитов CdS, в результате чего образуется мелкокристаллическая структура образца, что подтверждается сравнением профилей на рис. 3.

Поскольку на АСМ-изображениях образцов, полученных методом ГХО, имеются более значительные скопления и неоднородности по высоте рельефа, то распределение высот неровностей будет отличаться от нормального распределения (Гаусса). Поэтому средняя шероховатость и максимальная высота неровности рельефа могут быть в данном случае лишь вспомогательными параметрами, позволяющими оценить некую усредненную характеристику по всей сканированной площади образца. Для подобных сканов построение профилей (см. рис. 3) является необходимым шагом анализа, позволяющим оценить морфологию на различных микроучастках, отличающихся средней высотой неровностей и шероховатостью. Поскольку толщина пленок соизмерима с размерами кристаллитов, то это сравнение дает возможность оценить изменение среднего размера кристаллита в пленке. Сравнение профилей на рис. 3, а, и 3, б, подтверждает вывод об уменьшении размера среднего кристаллита при введении в состав пленки узкозонной фазы PbS с 1,00...2,00 мкм до 550...450 нм, несмотря на то что поверхность пленки выглядит более неоднородно (см. рис. 1, б) вследствие имеющихся скоплений размером до 2,5 мкм, связанных со спецификой метода ГХО.

Исследования, проведенные в режиме СМЗК, показали, что распределение поверхностного потенциала по пленке CdS, не имеющей узкозонных включений PbS, достаточно однородное, участки максимального и минимального потенциалов отличаются не более чем на 100...120 мВ (рис. 4, а). Изменение потенциала обусловлено наличием межзеренных разупорядоченных областей и скоплени-

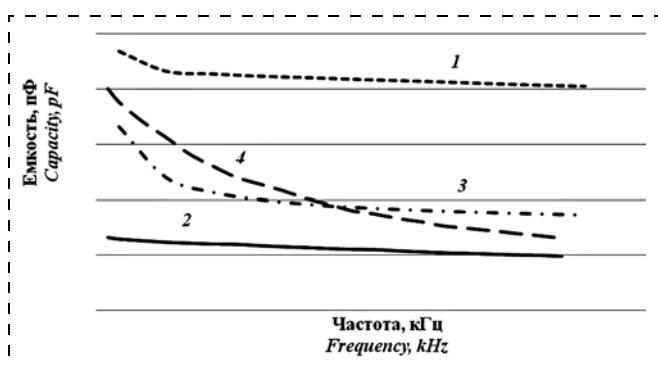


Рис. 5. Частотные зависимости емкости для пленок двух составов: 1, 2 — "чистый" CdS; 3, 4 — CdS с добавлением PbS. Зависимости 1, 3 — метод ТИВ; 2, 4 — метод ГХО

Fig. 5. Frequency dependences of the capacity for the films of two compositions: 1, 2 — "pure" CdS; 3, 4 — CdS with addition of PbS. Dependencies 1, 3 correspond to the TEV method, and 2, 4 — to the HCD method

ем на этих участках дефектов и примесных атомов. Средний перепад значений потенциала на субмикрометровых областях скана поверхности образца CdS-PbS, полученного методом ТИВ (рис. 4, б), составляет 250...260 мВ. Для образца, полученного методом ГХО (см. рис. 4, в), это значение достигает 300 мВ. Таким образом, наличие узкозонных включений PbS приводит к более значительным изменениям потенциала на субмикрометровых участках и обеспечивает возникновение локальных электрических полей на границах зерен до 10^5 В/м. Несколько меньшие значения градиента потенциала на границах зерен CdS и PbS в пленках, полученных методом ТИВ, могут быть обусловлены наличием более высоких температур в процессе получения пленки и, соответственно, более существенной взаимной растворимости компонентов CdS и PbS, приводящей к сглаживанию межфазных энергетических барьеров.

При добавлении PbS потенциальные барьеры между зернами в среднем увеличились в 2 раза, что отразилось на изменении проводимости образцов как на постоянном, так и на переменном токе, а также на временах релаксации электрического сигнала. Изменение импеданса образцов при введении PbS обусловлено в основном изменением емкостной составляющей. На рис. 5 показаны частотные зависимости эквивалентной емкости, полученной при измерениях импеданса исследуемых образцов в килогерцовом диапазоне частот.

Различные абсолютные значения емкости на малых частотах (рис. 5) связаны с разной возможностью накопления электрического заряда в объеме пленки. В мелкокристаллической (со средним размером кристаллита около 0,6 мкм) пленке CdS, полученной методом ГХО, объемная доля более низкоомных межкристаллитных пограничных областей более значительная, чем в пленке CdS со средним размером зерна 1,0...1,2 мкм, полученной методом ТИВ. Это приводит к тому, что на малых частотах материал, полученный методом ГХО, имеет меньшую эквивалентную емкость (кривая 2 на рис. 5) благодаря токам утечки по межкристаллитным границам. Введение PbS приводит к увеличению абсолютного значения емкости для образцов, полученных методом ГХО, что обусловлено появлением на границах фаз CdS и PbS областей, обедненных основными носителями заряда. В пленке CdS, полученной методом ТИВ, емкость незначительно уменьшается при введении узкозонного компонента благодаря преобладанию эффекта разупорядочения основной матрицы CdS, вносимого преципитатами нерастворенного избыточного компонента PbS, и, как следствие, уменьшению размеров зерен CdS.

Регистрация быстрого спада емкости на малых частотах свидетельствует о наличии медленных

Диапазон частот, кГц <i>Frequency range, kHz</i>	Характеристические времена τ , с <i>Characteristic times τ, s</i>			
	Метод термического испарения <i>Method of thermal evaporation</i>		Метод гидрохимического осаждения <i>Method of hydrochemical deposition</i>	
	CdS	CdS-PbS	CdS	CdS-PbS
Менее 3,5—4 <i>Less 3,5—4</i>	$1,26 \cdot 10^{-4}$	$4,37 \cdot 10^{-4}$	$2,32 \cdot 10^{-4}$	$5,60 \cdot 10^{-4}$
Более 4 <i>More 4</i>	$5,72 \cdot 10^{-5}$	$1,58 \cdot 10^{-5}$	$2,23 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-6}$

процессов и состояний, которые на больших частотах "выключаются", не успевая перезаряжаться и поставлять носители заряда в зону проводимости. В таблице показаны характеристические времена для "медленных" и "быстрых" процессов, рассчитанные, соответственно, для участков "быстрого" изменения емкости в зависимости от частоты и участков ее относительной стабилизации. Из анализа расчетных значений времен следует, что вне зависимости от способа синтеза пленки введение узкозонного компонента и получение гетерофазного материала приводит к некоторому увеличению (в 2—3 раза) времен, характеризующих "медленные" процессы. Это связано с увеличением энергетических барьеров на границах фаз CdS и PbS по сравнению с межзеренными границами в однокомпонентном поликристаллическом полупроводнике CdS. Значения времен, соответствующих "быстрым" процессам, введение компонента PbS уменьшает, причем в материале, полученном методом ТИВ, примерно в 3,6 раза, а в материале, полученном методом ГХО, — более чем на порядок. Тенденция к уменьшению времени перезарядки электронных состояний и релаксации емкостного сигнала может быть связана с двумя факторами. Первый фактор — это геттерирование узкозонной фазой PbS точечных технологических дефектов из основной матрицы (CdS), ответственных за возникновение мелких уровней, которые способствуют "затягиванию" процессов перезарядки благодаря эффектам "прилипания" на них носителей заряда. Второй фактор — это возникновение в запрещенной зоне CdS "глубоких" энергетических уровней, соответствующих растворенному свинцу. Глубокие уровни способствуют увеличению скорости рекомбинации носителей заряда, что также приводит к уменьшению характеристических времен материала.

Заключение

Таким образом, введение в состав пленки CdS малого количества PbS приводит к уменьшению времен перезарядки электронных состояний и ре-

лаксации электрического сигнала на частотах, превышающих 3...5 кГц, причем материал CdS—PbS, полученный методом ГХО, показал значения характеристических времен в указанном диапазоне частот на порядок меньше, а значения потенциальных барьеров на границах фаз CdS и PbS, способствующих повышению радиационной стойкости, на 15...20 % больше, чем в пленках CdS-PbS, полученных методом ТИВ. Это свидетельствует о перспективности использования более дешевого метода ГХО для получения радиационно-стойких фоточувствительных пленок в видимом диапазоне частот, поскольку, как показали наши более ранние работы [10, 19, 22, 23], создание такого потенциального рельефа в приповерхностных слоях пленки CdS значительно уменьшает нестабильность параметров образцов и увеличивает радиационную стойкость без ухудшения фоточувствительности.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект № 16-08-00524_a).

Список литературы

1. **Даньшина В. В., Калистратова Л. Ф.** Сравнительный анализ толщины и электрической проводимости тонких халькогенидных полупроводниковых пленок // Физика твердого тела. 2017. Т. 59, № 1. С. 172—175.
2. **Mohammed M. A., Mousa A. M., Ponpon J. P.** Optical and Optoelectric Properties of PbCdS Ternary Thin Films Deposited by CBD // Journal of semiconductor technology and science. 2009. Vol. 9, N. 2. P. 117—123.
3. **Lopez-Cabana Z., Sotomayor T. Cl. M., Gonzalez G.** Semiconducting properties of layered cadmium sulphide-based hybrid nanocomposites // Nanoscale Research Letters. 2011. Vol. 6, N. 1: 523. P. 1—8.
4. **Azjniuk Yu. M., Dzhagan V. M., Hutych Yu. I. et al.** Growth and spectroscopic characterization of organic polymer-stabilized CdS nanoparticles // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2009. Vol. 11, N. 3. P. 257—263.
5. **Власенко А. И., Любченко А. В.** Эффект вытягивания неосновных носителей в фоторезистивных кристаллах Cd_xHg_{1-x}Te с различным типом проводимости // Физика и техника полупроводников. 1994. Т. 28, № 7. С. 1219—1222.
6. **Хрипунов Г. С., Пирогов А. В., Горстка Т. А. и др.** Влияние наноразмерных слоев диоксида олова на эффективность пленочных солнечных элементов на основе CdS/CdTe // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 3. С. 406—412.
7. **Hardzei M., Artemiev M., Molinari M. et al.** Comparative Efficiency of Energy Transfer from CdSe—ZnS Quantum Dots or Nanorods to Organic Dye Molecules // ChemPhysChem. 2012. Vol. 13. P. 330—335.
8. **Luschitz J., Siepchen B., Schaffner J. et al.** CdTe thin film solar cells: Interrelation of nucleation, structure, and performance // Thin Solid Films. 2009. Vol. 517. P. 2125—2131.
9. **Дайнеко С. В., Артемьев М. В., Набиев И. Р. и др.** Солнечные ячейки на основе гибридных гетероструктур из органических полупроводников и квантовых точек // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 9. С. 2—6.
10. **Rokakh A. G., Stetsyura S. V., Trofimova N. B., Elagina N. V.** Stabilizing effect of doping with PbS on properties of CdS_xSe_{1-x} wide-gap photoconductors // Inorganic Materials. 1999. Vol. 35, N. 5. P. 452—454.
11. **Роках А. Г., Биленко Д. И., Шишгин М. И. и др.** Оптические спектры пленок CdS—PbS и возможность фотоэффекта в среднем инфракрасном диапазоне // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48, № 12. С. 1602—1606.
12. **Роках А. Г., Стецюра С. В., Жуков А. Г., Сердобинцев А. А.** Зависимость скорости ионного распыления от изменения электронной работы выхода, вызванного освещением // Письма в Журнал технической физики. 2006. Т. 32, № 1. С. 58—64.
13. **Rokakh A. G., Zhukov A. G., Stetsura S. V., Serdobintsev A. A.** Secondary-ion mass spectrometry of photosensitive heterophase semiconductor // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2004. Vol. 226, N. 4. P. 595—600.
14. **Бухаров В. Э., Роках А. Г., Стецюра С. В.** Влияние электронного облучения на рекомбинацию и прилипание в пленочных фотопроводниках на основе A2B6—A4B6 // Письма в Журнал технической физики. 1999. Т. 25, № 3. С. 66—72.
15. **Мирончук Г. Л., Давидюк Г. Е., Божко В. В., Кажукаускас В.** Особенности подпорогового дефектообразования в монокристаллах CdS и CdS:Cu при рентгеновском облучении // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44, № 5. С. 694—698.
16. **Obaid Ahmed. S., Mahdi M. A., Hassan Z., Bououdina M.** Preparation of chemically deposited thin films of CdS/PbS solar cell // Superlattices and Microstructures. 2012. Vol. 52, N. 4. P. 816—823.
17. **Иванов П. Н., Марков В. Ф., Мaskaeva Л. Н.** Роль размерного эффекта при осаждении пленок твердых растворов системы PbS—CdS гидрохимическим методом // Неорганические материалы. 2005. Т. 41, № 11. С. 1292—1296.
18. **Миронов О. А., Савицкий Б. А., Сипатов А. Ю. и др.** Сверхпроводимость полупроводниковых сверхрешеток на основе халькогенидов свинца // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 1988. Т. 48, № 2. С. 100—102.
19. **Роках А. Г., Стецюра С. В.** Влияние неоднородностей на фотоэлектрические характеристики гетерофазных пленок системы Cd_xSe_{1-x}—PbS // Неорганические материалы. 1997. Т. 33, № 2. С. 198—200.
20. **Maskaeva L. N., Forostyanaya N. A., Markov V. F., Voronin V. I.** Synthesis of films of solid solutions Cd_xPb_{1-x}S by the method of ion-exchange substitution // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2015. Vol. 60, N. 5. P. 552—559.
21. **Браташов Д. Н., Климова С. А., Сердобинцев А. А. и др.** Создание микронных областей с измененными люминесцентными свойствами и топологией на пленках Cd_xSe_{1-x} посредством лазерного отжига // Письма в Журнал технической физики. 2012. Т. 38, № 12. С. 45—52.
22. **Бухаров В. Э., Роках А. Г., Стецюра С. В.** Диффузационная модель деградационной стойкости гетерогенной фотопроводящей системы // Журнал технической физики. 2003. Т. 73, № 2. С. 93—98.
23. **Маяр И. В., Стецюра С. В.** Влияние морфологии и состава фаз поверхности на радиационную стойкость гетерофазного материала CdS—PbS // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45, № 7. С. 916—922.
24. **Mahdi M. A., Kasem S. J., Hassen J. J., Swadi A. A.** Structural and optical properties of chemical deposition CdS thin films // Int. J. Nanoelectronics and Materials. 2009. N. 2. P. 163—172.

S. V. Stetsyura, Ph. D., Associate Professor, e-mail: stetsyurasv@mail.ru;

P. G. Kharitonova, Postgraduate Student, e-mail: haritonovapg@gmail.com.

Saratov National Research State University named after N. G. Chernyshevsky, Saratov, 410012, Russian Federation

Corresponding author:

Kharitonova Polina G., Postgraduate Student, Saratov National Research State University

named after N. G. Chernyshevsky, Saratov, 410012, Russian Federation, e-mail: haritonovapg@gmail.com

Investigation of the Heterogeneous Polycrystalline Films Based on Cadmium Sulfide with Addition of Lead Sulfide

Received on October 04, 2017

Accepted on November 09, 2017

The authors carried out a comparative analysis of the morphology, surface potential and characteristic times of CdS and CdS-PbS films with predominance of the wide-band component of CdS obtained by the methods of the hydrochemical deposition (HCD) and thermal evaporation in vacuum (TEV). The authors demonstrated that for the samples received by the method of HCD the times of relaxation of the signal in the kHz range of frequencies was by an order less, and the potential barriers on the phase boundaries of CdS and PbS were more pronounced than those of for the samples obtained by the method of TEV. This makes the HCD method promising for obtaining of the photosensitive radiation-resistant materials.

Keywords: heterogeneous semiconductor films, cadmium sulfide, lead sulfide, hydrochemical deposition, thermal evaporation

For citation:

Stetsyura S. V., Kharitonova P. G. Investigation of the Heterogeneous Polycrystalline Films Based on Cadmium Sulfide with Addition of Lead Sulfide, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 277–286.

DOI: 10.17587/nmst.20.277-286

Introduction

The semi-conductor solid solutions with a controllable composition and possibility of varying of their physical, photo-electric and optical properties in a wide range are of interest as the photosensitive and luminescent materials for the electronic and optoelectronic technologies. Active research is going on of the possible use of the solid solutions on the basis of AIIBVI, as the film planar structures [1, 2], or in the form of the quantum-dimensional objects [3, 4]. So, for example, the composites and the solid solutions on the basis of cadmium chalcogenide and cadmium sulphide, in particular, (CdS with the width of the forbidden zone of 2.4 eV) allow us to create the heterojunctions, on which an effective separation of the charge carriers, increase of the life time of the nonequilibrium charge carriers [5], growth of the intensity of the photoluminescent processes, etc, take place. The CdS based materials are applied in various spheres of technologies, in particular, in manufacturing of the highly effective and inexpensive solar elements on heterojunctions [6–9].

Introduction of the boundedly soluble components into the composition of a material can lead to creation of a heterophase material with the heterojunctions between the nano- and microdimensional phases, which, in turn, can change radically the properties and expand the sphere of application of a material. Thus, CdS and PbS (lead sulphide with the width of the forbidden zone of 0.37...0.41 eV) form a number of solid solutions, at that, CdS is dissolved in PbS up to 4 mol. % at 600 °C and up to 31.5 mol. % at 1000 °C, while PbS is dissolved in CdS even at 1070 °C only up to 0.6 mol. %. As is known, addition of the lead sulphide into CdS in the quan-

tities, exceeding the solubility limit, leads to formation of the heterophase radiation-resistant structures [10]. This occurs due to the fact that in the wide-band CdS the narrow-band precipitates (phases) based on PbS, which are the getters of the radiation dot defects, are formed. During investigation of the heterophase film samples, received on the basis of the bounded solid solutions of CdS in PbS and PbS in CdS (CdS-PbS, in brief), the new optoelectronic and optoionic effects are also discovered [11–13], which expand the sphere of application of this heterophase material.

Thus, investigation of the technological modes and of the polycrystalline layers based on the bounded solid solutions of CdS-PbS is a topical task, because it allows us to reduce considerably the possible appearance of such drawbacks of AIIBVI compounds as a quick photofatigability, low speed of operation [10, 14], degradation under the influence of the external factors [15], and it offers new functionalities of the material.

As a rule, the heterophase systems on the basis of the above-mentioned components are received by one of the rather cheap and reproducible methods, among which, first of all, are the hydrochemical deposition (HCD) [16, 17] and the thermal evaporation in vacuum (TEV) [10, 18]. In manufacturing of the material the correlation of CdS and PbS components depends on the part of the spectrum, in which the photosensitive material is expected to be used. In the visible range the most widely used materials have the correlation of CdS and PbS components in the initial batch of 9:1 [19], in the infra-red range — 3:7 [20]. It is necessary to point out that the photoelectric properties of the thin films obtained by the TEV method have been studied more thoroughly [10, 14, 21–23],

because the thin film structures obtained by this method have a high reproducibility of the electrophysical parameters. At that, compared with the other thin-film technologies, HCD is distinguished by high efficiency, economy, and simplicity of the technological solutions, it allows deposition of films on the surfaces of big areas, complex forms and different nature, it is also known for a high adhesion of the films to the substrates and a possibility of doping of the layer with the organic ions or the molecules, not tolerant to a high-temperature heating.

Among the drawbacks of HCD are, first of all, instability of the parameters of the samples in a certain period after manufacturing and deterioration of the photosensitivity of the films in the course of time [24]. In many respects due to these reasons the HCD method was mainly employed for obtaining of the solid solutions with prevalence of the narrow-band PbS component for use of the material in the infra-red range, in which these drawbacks were less pronounced. Since solubility of CdS in PbS is rather high, an addition of a small quantity of CdS into the initial batch, as a rule, did not lead to formation of a heterophase material, but only promoted a smooth correction of the parameters of the lattice and properties of the film on the basis of PbS.

This work presents a comparative analysis of the morphology, surface potential and characteristic times of the CdS and CdS-PbS films received with prevalence of the wide-band CdS component by the methods of hydrochemical deposition and thermal evaporation in vacuum, and also presents conclusions concerning the prospects of application of this or that method.

1. Objects of research and the technology of synthesis

The work presents the results of the research of CdS-PbS polycrystalline heterophase films with the weight correlation of CdS and PbS in the initial batch of 9:1, and of the film, the initial batch of which contained "pure" CdS.

For synthesis by the TEV method a powder-like batch was used from CdS and PbS of the semi-conductor cleanliness level. CuCl₂ was added to the batch as the activator in the quantity up to 0.1 of weight %. The films were obtained in a single-crucible mode of evaporation in the vacuum maintained at 10⁻⁵ mm of the mercury column. Glass substrates were used at the temperature of 80...100 °C, the temperature of the resistive evaporator was 780 °C, at that, in order to avoid uncontrollable emissions of the substance, the sublimation temperature was achieved in several stages during an hour. As a result the films were obtained with a nanocrystalline structure practically insensible to illumination. The sensitization was done by annealing in the air at 545 ± 5 °C during 15 min. The thickness of the received films varied from 1 up to 1.3 μm.

For synthesis of the heterophase films of CdS-PbS by the HCD method a water solution was used with the concentration of 0.025 mol/l of the mixture of the following components: lead nitrate Pb(NO₃)₂ — 0.269 g, cadmium chloride CdCl₂ — 1.002 g and thiourea (NH₂)₂CS — 0.475 g. As a result of the hydrolysis of (NH₂)₂CS the sulphide-ions appeared in the solution and formation and deposition of cadmium and lead began. For reception of a homogeneous sample on the basis of only CdS the lead nitrate was not added.

2. Measurement technique and results of the research

Research of the surface by the methods of the scanning microscopy. For research of the received samples the methods were used, which allowed to characterize the surface morphology (the atomic-force microscopy — AFM) and the potential relief of the surface (Kelvin probe force microscopy — KPFM). ACM and KPFM measurements were taken with the help of NTEGRA-Spectra probe nanolaboratory (NT-MDT, Russia). The scanning was carried out with the frequency of 0.3...0.5 Hz in a semicontact mode in the air with the help of NSG11 cantilever with a gold deposition. For the data analysis Gwyddion 2.31 software was used.

The results of measurements of the morphology by the AFM method are presented in the form of the typical sites of the surface of the investigated structures received by the HCD method (fig. 1) and the TEV method (fig. 2). Fig. 3 presents the profiles of the surface relief along the lines on the corresponding AFM images, which allows us to estimate visually the variation of the degrees of the irregularities (roughnesses) of the surface of the samples, when PbS is added into the composition of the initial batch.

The distributions of the surface potential for CdS and CdS-PbS, received by means of various technologies, are presented in fig. 4. Presence of the micrometer sites with the surface potential lowered because of formation of PbS grains gives us a chance to estimate the intensity of the electric field and the power barrier on the boundaries of the narrow-band and wide-band phases.

Research of the characteristic times by the frequency characteristics. Measurement of the frequency characteristics of capacity C was taken on Cascade Microtech RM5 probe station in combination with Agilent Technologies B1500A device. The interval of variation of frequency f was 1 kHz...1 MHz at the amplitude of 50 mV of the alternating voltage. By the dependence $C(f)$ in fig. 5 the times of relaxation of signal τ were found in accordance with the following formula:

$$\tau = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1^2 - C_2^2}{(C_2 f_2)^2 - (C_1 f_1)^2}}, \quad (1)$$

where C_1 и C_2 — values of capacity on frequencies f_1 and f_2 in Hz, accordingly. The value of frequency f_1 was selected arbitrarily, while the value of f_2 was selected so that the value of the capacity on that frequency would be 0.7 times less than at f_1 . Fig. 5 does not show the high-frequency part of $C(f)$ characteristic, because at frequencies above 25 kHz a variation of the capacity was not observed.

3. Analysis of the results of the research

Analysis of fig. 1–3 shows that the samples received by the TEV method have a more homogeneous covering and no big congestions (heterogeneities) are observed on the surface, which is characteristic for the samples received by the HCD method.

Processing of the AFM images, done by means of Gwyddion 2.31 software, demonstrated that the average arithmetic roughness of CdS samples irrespective of the method of reception was within the range of 50...52 nm, but, at that, the maximal height of the roughnesses of the samples received by

the HCD method exceeded twice the value of this parameter of the samples received by the TEV method (see fig. 1 and 2). For the samples with a narrow-band component the roughness of the surface and the maximal height of the relief roughnesses decreased by 20...30 % in comparison with the samples without PbS, irrespective of the method of reception. This was connected with the fact that the formed precipitates of PbS contained the growth of the CdS crystallites, as a result of which a fine-crystalline structure of the sample was formed, and this was proved by the comparison of the profiles in fig. 3.

Since on the AFM images of the samples received by the HCD method there are more considerable aggregations and heterogeneities by the relief height, then the distribution of the heights of the roughnesses will differ from the normal distribution (of Gauss). Therefore, in this case the average roughness and the maximal height of a relief roughness can be only the auxiliary parameters, allowing us to estimate a certain averaged out characteristic for all the scanned area of the sample. For such scans construction of the profiles (see fig. 3) is a necessary step of the analysis, allowing us to estimate the morphology in various microsites, differing by the average height of the roughnesses. Since the thickness of the films is comparable with the sizes of the crystalline particles, this comparison provides an opportunity to estimate the variation of the average size of a crystalline particle in a film. Comparison of the profiles in fig. 3, a and 3, b confirms the conclusion about the reduction of the size of an average crystalline particle, in case of introduction of a narrow-band phase of PbS, from 1.0...2.0 μm down to 550...450 nm into the composition of the film, in spite of the fact, that the film surface looks more non-uniform (see fig. 1, b) due to the available aggregations with the sizes up to 2.5 μm , connected with the specificity of the HCD method.

The research in KPFM mode demonstrated that the distribution of the surface potential on the CdS film, which has no PbS inclusions, is rather homogeneous, the sites of the maximal and minimal potentials differ not more than by 100...120 mV (fig. 4, a). The variation of the potential is caused by the presence of the intergranular disordered areas and a congestion of defects and impurity atoms in these sites. The average difference in the values of the potentials in the submicrometer areas of the scan of the surface of the CdS-PbS sample, received by the TEV method (fig. 4, b), equals to 250...260 mV. For the sample received by the HCD method (fig. 4, c) this value reaches the level of 300 mV. Thus, the presence of the narrow-band inclusions of PbS leads to more considerable changes of the potential in the submicrometer sites and ensures appearance of the local electric fields on the boundaries of grains up to 10^5 V/m . Somewhat smaller values of the gradient of the potential on the boundaries of CdS and PbS grains in the films received by the TEV method can be due to the presence of higher temperatures in the course of obtaining of the film and, accordingly, to a more essential mutual solubility of the CdS and PbS components, leading to smoothing of the interphase energy barriers.

Addition of PbS on average doubled the potential barriers between the grains, which was reflected in the change of the conductivity of the samples, both on the direct current and the alternating current, and also on times of relaxation of the electric signal. Variation of the impedance of the samples in

case of introduction of PbS was mainly caused by a change in the capacitor component. Fig. 5 presents the frequency dependences of the equivalent capacity received during measurements of the impedance of the investigated samples in the kilohertz range of frequencies.

Different absolute values of the capacity on small frequencies (fig. 5) are connected with the different abilities of accumulation of an electric charge in a film volume. In a fine-crystalline CdS film (with the average size of a crystalline particle of about 0.6 μm) received by the HCD method, the volume fraction of the more low-resistance intercrystalline boundary areas is more considerable, than in the CdS film with the average size of a grain of 1.0—1.2 μm , received by the TEV method. This leads to the fact that on small frequencies the material, received by the HCD method, has smaller equivalent capacity (curve 2 in fig. 5), due to the leakage currents on the intercrystalline boundaries. Introduction of PbS results in an increase of the absolute value of the capacity for the samples, received by the HCD method, which is due to the appearance of the areas, impoverished by the basic charge carriers, on the boundaries of the CdS and PbS phases. In the CdS film received by the TEV method, the capacity decreases insignificantly in case of introduction of the narrow-band component, thanks to prevalence of the effect of disordering of the basic CdS matrix, brought by the precipitates of the undissolved redundant PbS component, and as a consequence, to reduction of the sizes of the CdS grains.

Registration of a fast recession of the capacity on the small frequencies testifies to the presence of the slow processes and states, which "are switched off" at bigger frequencies, having no time to be recharged and to deliver the charge carriers to the conductivity zone. The table presents the characteristic times for the "slow" and "fast" processes, calculated, accordingly, for sites of a "fast" variation of the capacity, depending on the frequency and the sites of its relative stabilization. From the analysis of the calculated values of times it follows, that regardless of the method of synthesis of a film, the introduction of a narrow-band component and reception of a heterophase material leads to a certain (double or triple) increase of the times characterizing the "slow" processes. This is connected with an increase of the energy barriers on the boundaries of CdS and PbS phases in comparison with the grain boundaries in a single-component polycrystalline semiconductor of CdS. Introduction of a PbS component reduces the values of the times corresponding to the "fast" processes, in the material received by the TEV method approximately in 3.6 times, and in the material received by the HCD method — more than 10 times. The trend for reduction of the time for a recharge of the electronic states and relaxation of a capacitor signal can be connected with two factors. The first is gettering by the PbS narrow-band phase of the dot technological defects from the basic matrix (CdS), responsible for occurrence of the small levels, which contribute to "tightening" of the processes of a recharge due to the effects of "sticking" of the charge carriers to them. The second is appearance in the forbidden CdS zone of the "deep" energy levels corresponding to the dissolved lead. The deep levels promote increase of the speed of recombination of the charge carriers, which also leads to a reduction of the characteristic times of a material.

Conclusion

So, introduction of a small quantity of PbS in the composition of the CdS film leads to a reduction of the times for recharging of the electronic states and relaxation of the electric signal on the frequencies exceeding 3...5 kHz, at that, the CdS—PbS material, received by the HCD method, demonstrated the values of the characteristic times in the specified range of frequencies by an order less, while the values of the potential barriers on the boundaries of the CdS and PbS phases, promoting increase of the radiation resistance, by 15...20 % more than in the CdS-PbS films received by the TEV method. This testifies to the good prospects of the use of the less expensive HCD method for reception of the radiation-resistant photosensitive films in the visible range of frequencies, because, as our earlier works [10, 19, 22, 23] demonstrated, creation of such a potential relief in the near-surface layers of the CdS film reduces considerably the instability of the parameters of the samples and increases the radiation resistance without a deterioration of the photosensitivity.

The research was done with support of RFBR (project № 16-08-00524_a).

References

1. **Dan'shina V. V., Kalistratova L. F.** Sravnitel'nyj analiz toshhhiny i jelektricheskoy provodimosti tonkih hal'kogenidnyh poluprovodnikovyh plenok, *Fizika tverdogo tela*, 2017, vol. 59, no. 1, pp. 172–175 (in Russian).
2. **Mohammed M. A., Mousa A. M., Ponpon J. P.** Optical and Optoelectric Properties of PbCdS Ternary Thin Films Deposited by CBD, *Journal of semiconductor technology and science*, 2009, vol. 9, no. 2, pp. 117–123.
3. **Lopez-Cabana Z., Sotomayor T. Cl. M., Gonzalez G.** Semiconducting properties of layered cadmium sulphide-based hybrid nanocomposites, *Nanoscale Research Letters*, 2011, vol. 6, no. 1: 523, pp. 1–8.
4. **Azniuk Yu. M., Dzhagan V. M., Hutych Yu. I.** et al. Growth and spectroscopic characterization of organic polymer-stabilized CdS nanoparticles, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2009, vol. 11, no. 3, pp. 257–263.
5. **Vlasenko A. I., Ljubchenko A. V.** Jeffekt vytjagivanija neosnovnyh nositelej v fotorezistivnyh kristallah Cd_xHg_{1-x}Te s razlichnym tipom provodimosti, *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1994, vol. 28, no. 7, pp. 1219–1222 (in Russian).
6. **Hripunov G. S., Pirogov A. V., Gorstka T. A.** et al. Vlijanie nanorazmernykh sloev dioksida olova na jeffektivnost' plenochnyh solnechnykh jelementov na osnove CdS/CdTe, *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2015, vol. 49, no. 3, pp. 406–412 (in Russian).
7. **Hardzei M., Artemev M., Molinari M.** et al. Comparative Efficiency of Energy Transfer from CdSe-ZnS Quantum Dots or Nanorods to Organic Dye Molecules, *ChemPhysChem*, 2012, vol. 13, pp. 330–335.
8. **Luschitz J., Siepchen B., Schaffner J.** et al. CdTe thin film solar cells: Interrelation of nucleation, structure, and performance, *Thin Solid Films*, 2009, vol. 517, pp. 2125–2131.
9. **Dajneko S. V., Artem'ev M. V., Nabiev I. R.** et al. Solnechnye jachejki na osnove gibrnidnyh geterostruktur iz organicheskikh poluprovodnikov i kvantovyh tochek, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 9, pp. 2–6 (in Russian).
10. **Rokakh A. G., Stetsyura S. V., Trofimova N. B., Elagina N. V.** Stabilizing effect of doping with PbS on properties of CdS_xSe_{1-x} wide-gap photoconductors, *Inorganic Materials*, 1999, vol. 35, no. 5, pp. 452–454.
11. **Rokakh A. G., Bilenko D. I., Shishkin M. I.** et al. Opticheskie spektry plenok CdS—PbS i vozmozhnost' fotojeffekta v sredнем infrakrasnom diapazone, *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2014, vol. 48, no. 12, pp. 1602–1606 (in Russian).
12. **Rokakh A. G., Stecjura S. V., Zhukov A. G., Serdobincev A. A.** Zavisimost' skorosti ionnogo raspylenija ot izmenenija jelektronnoj raboty vyhoda, vyzvannogo osveshheniem, *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2006, vol. 32, no. 1, pp. 58–64 (in Russian).
13. **Rokakh A. G., Zhukov A. G., Stetsura S. V., Serdobincev A. A.** Secondary-ion mass spectrometry of photosensitive heterophase semiconductor, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2004, vol. 226, no. 4, pp. 595–600.
14. **Buharov V. Je., Rokakh A. G., Stecjura S. V.** Vlijanie jelektronnogo obluchenija na rekombinaciju i prilipanie v plenochnyh fotoprovodnikah na osnove A2B6—A4B6, *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1999, vol. 25, no. 3, pp. 66–72 (in Russian).
15. **Mironchuk G. L., Davidjuk G. E., Bozhko V. V., Kazhukauskas V.** Osobennosti podporogovogo defektoobrazovaniya v monokristallah CdS i CdS:Cu pri rentgenovskom obluchenii, *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2010, vol. 44, no. 5, pp. 694–698 (in Russian).
16. **Obaid A. S., Mahdi M. A., Hassan Z., Bououdina M.** Preparation of chemically deposited thin films of CdS/PbS solar cell, *Superlattices and Microstructures*, 2012, vol. 52, no. 4, pp. 816–823.
17. **Ivanov P. N., Markov V. F., Maskaeva L. N.** Rol' razmernogo jeffekta pri osazhdennii plenok tverdyh rastvorov sistemy PbS-CdS gidrohimicheskim metodom, *Neorganicheskie materialy*, 2005, vol. 41, no. 11, pp. 1292–1296 (in Russian).
18. **Mironov O. A., Savickij B. A., Sipatov A. Ju.** et al. Sverprovodimost' poluprovodnikovyh svrsheshetok na osnove hal'kogenidov svinka, *Pis'ma v zhurnal eksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki*, 1988, vol. 48, no. 2, pp. 100–102 (in Russian).
19. **Rokakh A. G., Stecjura S. V.** Vlijanie neodnorodnosti na fotojelektricheskie harakteristiki geterofaznyh plenok sistemy Cd_xSe_{1-x}-PbS, *Neorganicheskie materialy*, 1997, vol. 33, no. 2, pp. 198–200 (in Russian).
20. **Maskaeva L. N., Forostyanaya N. A., Markov V. F., Voronin V. I.** Synthesis of films of solid solutions Cd_xPb_{1-x}S by the method of ion-exchange substitution, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2015, vol. 60, no. 5, pp. 552–559.
21. **Bratašov D. N., Klimova S. A., Serdobincev A. A.** et al. Sozdanie mikronnyh oblastej s izmenennymi ljuminescentnymi svojstvami i topologiej na plenkah CdS_xSe_{1-x} posredstvom lazernogo otzhiga, *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2012, vol. 38, no. 12, pp. 45–52 (in Russian).
22. **Buharov V. Je., Rokakh A. G., Stecjura S. V.** Diffuzionnaja model' degradacionnoj stojkosti geterogennoj fotoprovodjashhej sistemy, *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2003, vol. 73, no. 2, pp. 93–98 (in Russian).
23. **Maljar I. V., Stecjura S. V.** Vlijanie morfologii i sostava faz poverhnosti na radiacionnuju stojkost' geterofaznogo materiala CdS-PbS, *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2011, vol. 45, no. 7, pp. 916–922 (in Russian).
24. **Mahdi M. A., Kasem S. J., Hassen J. J., Swadi A. A.** Structural and optical properties of chemical deposition CdS thin films, *Int. J. Nanoelectronics and Materials*, 2009, no. 2, pp. 163–172.

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

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ. ЧАСТЬ 1. ТЕРМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОТОЧНЫХ РЕАКТОРАХ

Поступила в редакцию 12.01.2018

В части 1 обзора проанализированы состояние и направления развития технологий получения стехиометрических тонких пленок нитрида кремния (С-ТПНК) для интегральных микросхем (ИМС) и микроэлектромеханических систем (МЭМС). Рассмотрены промышленные процессы при термической активации SiH_4 , $SiCl_4$, SiH_2Cl_2 и газообразного аммиака в проточных реакторах для химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ), а также направления их модификаций. Снижение температуры и давления при ХОГФ позволяет улучшить конформность С-ТПНК на трехмерных (3D) структурах устройств ИМС и МЭМС. Обогащение пленок кремнием позволяет получать пленки с уменьшенными механическими напряжениями для применений в МЭМС. Проанализированы некоторые примеры новых реагентов на основе кремния для ХОГФ (Si_2Cl_6), новые конструкции реакторов. Рассмотренные направления не обнаружили перспектив принципиального улучшения конформности тонких пленок для сложных 3D-структур.

Ключевые слова: нитрид кремния, тонкие пленки, термическая активация химических реакций, проточные реакторы, интегральные микросхемы, микросистемная техника

Введение

Тонкопленочные неорганические материалы являются основой современных электронных компонентов, изготавливаемых с помощью интегральных технологий микроэлектроники,nano- и микросистемной техники. Хронологически первыми в технологии интегральных микросхем (ИМС) начали использовать тонкие пленки (ТП) диоксида кремния и силикатных стекол, нитрида кремния, поликристаллического кремния [1]. Ведущее место для создания ТП занимают методы химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ), при которых необходимый материал синтезируется путем химических реакций непосредственно в ходе многостадийных технологических циклов изготовления ИМС. Совокупность общих вопросов ХОГФ тонких пленок применительно к технологии ИМС была детально обобщена в работе [2]. В работе [3] были выделены основные итоги, тренды и задачи развития методов ХОГФ тонких пленок для перспективных ИМС и nano- и микроэлектромеханических систем (далее — МЭМС).

Тонкие пленки нитрида кремния (далее — ТПНК), описываемого стехиометрической формулой Si_3N_4 (соотношение $Si:N = 1:1,33$), являются одним из наиболее востребованных диэлектриков в технологии ИМС и МЭМС. Применение ТПНК основывается на наличии у Si_3N_4 ряда уникальных свойств, например устойчивости к агрессивным химическим кислотам (фтористоводородная, горячая ортофосфорная), отличии скоростей плазменного травления во фторсодержащих газовых

смесях от таковых для диоксида кремния, что обеспечивает селективность травления, повышенной твердости, геттерирующих свойств по отношению к нежелательным для технологии ИМС ионам натрия и т.д. [4, 5]. К настоящему времени методы и оборудование получения ТПНК при ХОГФ по реакциям аммонолиза (реакциям с аммиаком NH_3) соединений кремния прошли многолетнюю апробацию в массовом производстве ИМС и МЭМС. Однако развитие интегральных технологий ставит новые задачи как по оптимизации и модификации существующих процессов/состава/свойств ТПНК, так и по разработке новых методов ХОГФ ТПНК. Цель настоящего обзора — анализ состояния и направлений развития технологий получения ТПНК на базе информационных источников трех последних десятилетий. Основное внимание удалено получению ТПНК, составу и основным физико-химическим свойствам ТПНК. В части 1 рассматриваются термически активированные процессы в проточных реакторах ХОГФ.

Состав тонких пленок нитрида кремния

В случае получения ТПНК методами ХОГФ использование стехиометрической формулы Si_3N_4 не является однозначным. Состав получаемого материала зависит от типа исходных химических реагентов и от условий ХОГФ, главным из которых является температура. Например, в составе ТПНК как остаточные могут присутствовать элементы из исходных химических реагентов (хлор, кислород, углерод). Однако помимо кремния и азота, наиболее распространенный компонент ТПНК — водо-

род, источником которого являются исходные реагенты. Концентрация водорода в ТПНК может быть от нескольких единиц (высокие температуры ХОГФ) до нескольких десятков атомных процентов (низкие температуры получения ХОГФ) [5]. Это принципиально для многих приложений, в том числе для МЭМС [6, 7]. Таким образом, для характеристики реального состава ТПНК в общем виде правильнее использовать общую формулу $\text{Si}_x\text{N}_y\text{H}_z$. В литературе встречаются такие обозначения пленок, как SiN_x [8] и $\alpha\text{-SiN}_x$ [9] для пленок с концентрацией водорода менее 5 % и $\alpha\text{-SiN}_x\text{:H}$ [9] и $\alpha\text{-SiN:H}$ [10] для пленок с концентрацией водорода более 5 %. При высокотемпературных отжигах концентрация водорода с ТПНК снижается. Представления о составе пленок можно косвенно, но быстро составить по значению показателя преломления (n): для стехиометрического Si_3N_4 $n = 2,02 \pm 0,02$; значения выше соответствуют обогащению материала кремнием, значения ниже — обогащению материала, как правило, кислородом [4, 5].

Промышленные технологии получения ТПНК при ХОГФ

В интегральных технологиях для получения материалов на полупроводниковых подложках (диски диаметром до 300 мм, толщиной до 1 мм) используют два направления технологических процессов ХОГФ.

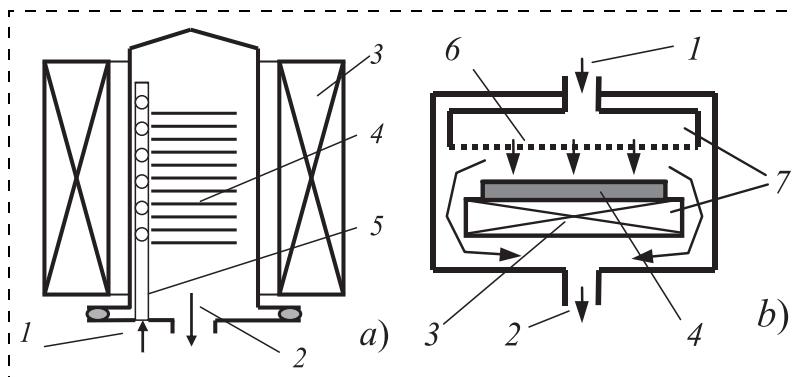
Направление 1 включает процессы ХОГФ при температурах 750...900 °C в так называемых объемных (групповых) трубчатых проточных реакторах низкого давления (РНД) с "горячими стенками" (рис. 1, a)) (такие реакторы известны как Low Pressure CVD, LPCVD). Процессы реализованы за счет термической активации химических реакций

аммонолиза моносилана или его хлорзамещенных. Концентрация водорода в таких ТПНК обычно составляет менее 5 % [5—7], и их можно считать стехиометрическими; ниже эти ТПНК обозначены как С-ТПНК. Такие С-ТПНК необходимы, например, для использования в субмаршруте изготовления ИМС, известном как Front-End-of-Line (FEOL), допускающем высокие температуры обработки. В ходе FEOL формируются транзисторные структуры ИМС с элементами их изоляции с помощью высокотемпературного окисления участков в кремнии (LOCAl Oxidation of Silicon, LOCOS), изолирующих траншей в кремнии с их заполнением диоксидом кремния (Shallow Trench Isolation, STI), изолирующих областей "спейсер" ("spacer") для затворов транзисторов. В технологиях МЭМС С-ТПНК используют в качестве защитных покрытий на кремниевом при необходимости длительного травления открытых участков кремния путем анизотропного травления в водных растворах KOH [11]).

Брутто-реакции аммонолиза соединений кремния и основные характеристики соответствующих процессов ХОГФ для получения С-ТПНК приведены ниже.

Реакция аммонолиза моносилана (SiH_4 , газ при нормальных условиях) описывается схемой $3\text{SiH}_4 + 4\text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{H}_2$. Достоинством процесса, реализованного в интервале температур 750...800 °C, при давлении около 130 Па, соотношении $\text{NH}_3/\text{SiH}_4 > \sim 50$, является отсутствие накопления побочных продуктов реакции на стенах реактора и вакуумной системы. Недостатки процесса: низкая производительность (для ее увеличения используют так называемый проточнодиффузионный реактор, представляющий собой цилиндрическую трубу, внутри которой размещается перфорированный цилиндрический контейнер с подложками [2]); неоднородность толщины С-ТПНК на подложках; неконформность роста на рельфе ИМС; макродефектность С-ТПНК.

Реакция аммонолиза тетрахлорсилина (SiCl_4 , жидкость при нормальных условиях) описана схемой $3\text{SiCl}_4 + 16\text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{NH}_4\text{Cl}$. Достоинства процесса, проводимого в РНД при 800...900 °C, давлении до нескольких сотен паскалей, соотношении $\text{NH}_3/\text{SiCl}_4 > \sim 10$: высокая производительность (100 подложек/процесс) в простом цилиндрическом РПД; хорошая однородность С-ТПНК и конформность роста на рельфе ИМС; отсутствие макродефектов; возможность выращивания пленки одинаковой толщины и равномерности толщины одновременно с двух сторон подложек. Недостатки: необходимость использования газоносителя для подачи паров SiCl_4 .



Схемы основных типов промышленных проточных реакторов для получения С-ТПНК в РНД (a) и КАВ-ТПП при ПХО (b): 1 — ввод реагентов; 2 — вывод побочных продуктов реакции; 3 — нагреватель; 4 — полупроводниковая подложка; 5 — распределительный ввод (опционально); 6 — душевое распределительное устройство; 7 — радиочастотный электрод

Simplified sketches of production flow reactors for stoichiometric silicon nitride deposition in hot-wall CVD system (a) and non-stoichiometric films in single-wafer plasma-enhanced cold-wall CVD system (b): 1 — reactants "in"; 2 — reaction by-products "out"; 3 — heater; 4 — semiconductor wafer; 5 — distributed feed (optional); 6 — gas mixture assembly or showerhead; 7 — Radio frequency electrode

(азот, аргон); частая необходимость химической обработки (очистки) реактора и стенок вакуумной системы от осадков типа NH_4Cl .

Схему роста С-ТПНК для реакции аммонолиза дихлорсилана (SiH_2Cl_2 , газ при нормальных условиях) отображают следующим образом: $3\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + 10\text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 6\text{NH}_4\text{Cl} + 6\text{H}_2$. В настоящее время аммонолиз SiH_2Cl_2 — основной промышленный метод получения С-ТПНК для технологий ИМС и МЭМС, реализованный в цилиндрических РНД при $700\ldots 800^\circ\text{C}$, давлении около 50 Па, соотношении $\text{NH}_3/\text{SiH}_2\text{Cl}_2 > \sim 5$. Достоинства в целом аналогичны с SiCl_4 , но количество нежелательных побочных продуктов вдвое меньше.

Рассмотренные методы получения С-ТПНК имеют хорошее теоретическое описание. Особенности кинетики роста С-ТПНК при ХОГФ с участием SiH_4 , SiCl_4 и SiH_2Cl_2 систематизированы и количественно описаны в [2]. Процессы ХОГФ реализуются в так называемой кинетической области, которая характеризуется линейной зависимостью в "аррениусовых координатах" (логарифмы константы скорости реакции против обратной абсолютной температуры). Предложена схема универсальной двухстадийной последовательной реакции со стадиями образования промежуточного продукта (ПП) в газовой фазе и его расходования на поверхности подложки: "Исходные реагенты \rightarrow ПП \rightarrow С-ТПНК + побочные продукты". По реакции аммонолиза SiH_4 рост С-ТПНК описан как лимитирующийся стадией гомогенного образования в газовой фазе ПП (предполагалось, что это могут быть, например, SiH_2 , SiH_3 , азотсодержащие ПП и т.д. [5]). В этом случае диффузия медленно образующегося ПП к поверхности подложек в объемном реакторе (рис. 1, a) является критически важной и определяет обозначенные выше недостатки процесса ХОГФ. Процессы ХОГФ по реакциям аммонолиза SiH_2Cl_2 и SiCl_4 с практически идентичными кинетическими характеристиками в РНД описаны как лимитируемые стадией расходования ПП на поверхности подложек (гетерогенная стадия). В качестве ПП в данном случае выступают соединения $\text{SiH}_2\text{ClNH}_2$ и SiCl_3NH_2 , быстро образующиеся в газовой фазе путем присоединения аммиака к хлоридам кремния с отщеплением HCl . В результате этого в реакторе ХОГФ устанавливается постоянная концентрация ПП, а следствием лимитирования процесса ХОГФ гетерогенной стадией является независимость от диффузионных процессов. Как следствие, процесс идет с малыми (около 1 %) неоднородностями толщины и свойств пленок С-ТПНК в РНД, а также с очень высокой ($> 90\%$) конформностью их нанесения на сложные рельефы ИМС. Количественное описание закономерностей роста С-ТПНК в РНД с помощью кинетики последовательных необратимых реакций первого порядка в так называемых замкнутых системах [12] позволило адекватно объяснить сово-

купность наблюдаемых сходств и отличий роста С-ТПНК и предложить подходы для модернизации процессов.

Направление 2 включает варианты технологических процессов при низких температурах (менее 450°C). Процессы осуществляются, как правило, из моносилана, аммиака и азота при различных соотношениях с использованием плазменной активации (далее обозначаются как "плазмохимическое осаждение, ПХО"). Направление ПХО реализовано, как правило, в проточных реакторах индивидуального типа, например диодного типа с холодными стенками, показанного на рис. 1, b. В зарубежной литературе такие реакторы называют "Plasma-Enhanced CVD, PECVD". При ПХО формируются нестехиометрические ТПНК, конкретный состав которых зависит от температуры, природы реагентов и состава парогазовой смеси, плотности высокочастотной мощности, удаленности плазменного источника от подложки и т.д. В отличие от высокотемпературных процессов ХОГФ С-ТПНК, для плазменных процессов адекватных брутто-реакций в литературе нет. Ниже для отличия таких нестехиометрических материалов от высокотемпературных С-ТПНК автор использует термин "кремний-азот-водородсодержащие тонкие пленки, КАВ-ТП", что идентично обозначениям $\alpha\text{-SiN}_x\text{:H}$ [9] и $\alpha\text{-SiN:H}$ [10]. Высокотемпературные отжиги КАВ-ТП приводят к потере водорода, и, соответственно, состав таких пленок может приближаться к стехиометрическому. Процессы ПХО используются в допускающем только низкие температуры субмаршруте изготовления ИМС, известном как back-end-of-line (BEOL — формирование многоуровневой системы металлизации ИМС), например, для финишной пассивации ИМС или в качестве стоп-слоев для травления.

Принципиальным недостатком всех процессов ПХО является сильная неконформность пленок, что является принципиальным ограничением по применяемости в перспективных приборах. Этот вопрос подробно рассмотрен в монографии [2]. Плазменные методы получения тонких пленок не являются строго химическими процессами, не описаны адекватными схемами процессов и в большей степени зависят от используемой аппаратуры. В связи с этим такие пленки представляют самостоятельный интерес и находятся вне рамок данного обзора.

Направления совершенствования технологий ХОГФ ТПНК

Для проточных реакторов можно выделить четыре направления развития термически активированных процессов ХОГФ ТПНК в проточных реакторах.

Совершенствование существующих промышленных процессов получения С-ТПНК в проточных РНД. Совершенствование подразумевает уточнение ба-

зовых режимов процессов (в основном имеется в виду процесс аммонолиза дихлорсилана), чаще всего — температуры, давления, значений газовых потоков [13, 14]. Целью является улучшение характеристик процесса получения С-ТПНК, например снижение неравномерности толщины пленки на подложках, повышение повторяемости процесса и т.д.; состав и свойства материала при этом остаются неизменными. Улучшение конформности осаждения ТП для структур с повышенными аспектными отношениями для гетерогенных процессов может быть оптимизировано с использованием подхода, называемого "критерий (модуль) Тиле" (заимствован из теории гетерогенного катализа, связывает процессы диффузии и константу скорости гетерогенной реакции); в общем виде достигается путем снижения давления и температуры процессов ХОГФ [2]. Имеются также примеры моделирования этого процесса [15, 16].

Модернизация процессов получения пленок в проточных реакторах ХОГФ. Под модернизацией (как правило, относительно базового процесса) подразумеваются принципиальные изменения режимов ХОГФ, но без изменения типа исходных реагентов или способа подачи реагентов при ХОГФ, в целях поиска новых составов и свойств материалов. Для МЭМС такими новыми свойствами пленок оказались механические напряжения [17, 18]. В работе [17] в проточных РНД при прочих неизменных условиях (800...850 °C и 30...70 Па) путем изменения соотношения $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ до 14 (то есть при сильном обогащении газовой смеси по дихлорсилану) получали обогащенные кремнием пленки со сниженными механическими напряжениями. Далее такие пленки обозначены "обогащенные кремнием ТПНК" или ОК-ТПНК. В результате увеличения соотношения $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ в указанных выше пределах показатель преломления пленок изменялся от типичного значения для С-ТПНК ~2,0 до обогащенного по кремнию ~2,7. При этом механические напряжения в ОК-ТПНК плавно снижались с 1,2...1,4 ГПа до ~ −0,15 ГПа. Близкие значения механических напряжений, около 0,13 ГПа, представлены в работе [18], где исследования проведены при температуре 835...875 °C, давлении 39 Па и фиксированном значении отношения газовых потоков $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3 = 10$. Скорости растворения для ОК-ТПНК в стандартизованных в технологии ИМС растворах: травителя для оксида — Buffred Oxide Etch, BOE (25 °C), 40 % HF (25 °C) и H_3PO_4 (160 °C) были примерно в 2,5—3, а в KOH (50 °C) — примерно 5 раз меньше, чем таковые для С-ТПНК. Аналогичные исследования выполнены авторами работы [19] для моносилана и аммиака в РНД в интервале 725...775 °C и соотношении $\text{NH}_3/\text{SiH}_4 = 0,2...1,6$. Изменения механических напряжений в пленках составляли от −0,5 ГПа до 0,9 ГПа.

Авторы приведенных выше работ отмечали, что при получении ОК-ТПНК равномерность пленок сильно ухудшалась по длине рабочей зоны РНД. По мнению автора обзора, причина этого заключается в том, что при малых соотношениях аммиака к кремнийсодержащему исходному реагенту высокие температуры ХОГФ создают условия для параллельного протекания реакций пиролиза (термического разложения) исходных кремнийсодержащих реагентов SiH_4 и SiH_2Cl_2 . Возможность термораспада этих реагентов в близких экспериментальных условиях компонентов были исследованы, например, в работах [20, 21]. Параллельно протекающие реакции пиролиза вызывают накопление концентраций побочных продуктов по длине реакционной зоны РНД. Таким образом, при осаждении ОК-ТПНК в проточных РНД в каждом условном сечении рабочей зоны реактора концентрации исходных реагентов и побочных продуктов будут различаться. Соответственно, по длине реакторов будут различаться и состав, и свойства ОК-ТПНК, указывая на непригодность применения таких процессов и реакторов для производства МЭМС.

Автору представляется, что более удачным вариантом получения ОК-ТПНК могло бы служить плазменное осаждение при пониженной температуре около 400 °C. На такую возможность, в частности, указывают результаты работы [22], авторы которой изучали синтез и свойства пленок так называемого полуизолирующего поликристаллического кремния, полученного в проточном РНД с электродной системой (см. детали в работе [23]) при соотношении $\text{NH}_3/\text{SiH}_4 = 0,5...5$. Механические напряжения таких близких к ОК-ТПНК пленок находились в области сжатия в диапазоне −0,9...−0,3 ГПа. Преимущество данного процесса состоит в отсутствии каких-либо термоактивированных реакций аммонолиза и термораспада при низких температурах осаждения, т.е. закономерности роста ТП преимущественно определяются конструкцией оборудования и характеристиками используемого плазменного разряда. Более того, получение пленок в индивидуальных плазменных реакторах (рис. 1, b) может дать еще более равномерные покрытия, хотя процессы ПХО имеют ограничения по конформности осаждения.

Новые реагенты для получения ТПНК в проточных реакторах ХОГФ. Общей целью исследований этого типа был поиск реагентов, позволяющих существенно понизить температуру осаждения. Авторы работы [24] изучали ТПНК, полученные в РНД с "горячими стенками" из трис(диметиламино)силана $((\text{CH}_3)_2\text{N})_3\text{SiH}$ и аммиака при температуре 650...900 °C и давлении менее 130 Па. Авторы искали так называемый *environment friendly* — кремнийсодержащий реагент, способный заменить в производстве ИМС опасные (SiH_4) и корrodирующие (SiH_2Cl_2 , SiCl_4) реагенты. Рост пленок в диапазоне 650...800 °C и давлении 20...80 Па с соотно-

шением $\text{NH}_3/((\text{CH}_3)_2\text{N})_3\text{SiH}$ от 1 до 10 составлял от 0,3 до 9,0 нм/мин. Оптимальной температурой осаждения авторы посчитали 800 °C и соотношение $\text{NH}_3/((\text{CH}_3)_2\text{N})_3\text{SiH} = 10$. В составе пленок обнаружен углерод с концентрацией до 5 ат. % и водород (концентрация не приводится). Конформность покрытий была оценена для структуры глубиной 1 мкм и шириной 0,75 мкм на уровне всего 70 %. Авторы [25] исследовали возможность роста пленок $\text{SiN}_x:\text{H}$ при температуре 250...500 °C с участием смеси олигомера Si_2Cl_6 и гидразина N_2H_4 . Скорость осаждения составляла около 4 нм/мин, а показатель преломления 1,67...1,75. Скорость осаждения резко снижалась при температурах менее 350 °C, что было объяснено образованием подобных NH_4Cl материалов. Концентрация водорода оценена на уровне 30 ат. %. Авторы [26] исследовали рост пленок из SiI_4 и аммиака в реакторе атмосферного типа при 350...550 °C. Скорости роста составляли около 80 нм/мин, концентрация иода в пленках составляла 0,8...4,2 ат. %, концентрация водорода около 30 ат. %. Конформность ТП оценена авторами лучше 85 % на структуре с размерами 1,6 мкм на 1 мкм, однако с наклонными стенками, что не позволяет сделать адекватных сравнительных оценок. Авторы [27] исследовали рост пленок из гексаметилдисилоксана $(\text{CH}_3)_3\text{SiOSi}(\text{CH}_3)_3$ и аммиака при атмосферном давлении и температурах 750...850 °C. При оптимальной температуре осаждения 800 °C достигнутые значения показателя преломления 1,88 соответствовали скорее оксинитриду кремния.

Новые конструкции проточных реакторов для получения ТПНК при ХОГФ. В данном разделе автор хотел бы акцентировать внимание на так называемом каталитическом ХОГФ, в зарубежной литературе называемом Catalytic CVD, Cat-CVD или Hot-Wire CVD, HWCVD. Суть метода заключается в том, что в проточных реакторах разбавленная инертным газом реакционная смесь аммиака с дисиланом Si_2H_6 [28] или SiH_4 [29] проходит сначала над вольфрамовой проволокой/лентой, нагретой до высокой температуры (около 2000 °C), и далее поступает к подложке, находящейся при температуре около 300 °C. При этом форма подложек и их размеры могут сильно различаться, так же как форма и положение вольфрамовой нити. При осаждении достигаются высокие скорости порядка 80...170 нм/мин [28]. Детальный отчет по этому виду получения пленок применительно к созданию фотовoltaических устройств различного размера и формы приведен в ссылке [29]. По оценке автора обзора, такой метод, как и иные методы ХОГФ с активацией реагентов, вряд ли может быть эффективен для решения задач создания конформных покрытий в устройствах ИМС и МЭМС с высоко-аспектными структурами.

Заключение

Непрерывное совершенствование и развитие технологий ИМС и МЭМС ставит новые задачи перед технологиями создания тонкопленочных покрытий. К главным из них можно отнести получение пленок заданного состава и свойств, а также конформность роста пленок на высокоаспектных структурах современных приборов. Проведенный обзор литературы позволил выделить следующие тенденции развития технологий получения ТПНК при термической активации реагентов в проточных реакторах. К ним относятся: поиск новых исходных кремнийсодержащих реагентов, снижение температуры процессов ХОГФ, поиск новых конструкций реакторов для ХОГФ. Обсуждаемые в литературе решения по модификации состава тонких пленок для получения новых свойств, необходимых для МЭМС-приложений, требуют тщательного анализа возможностей их аппаратурной реализации для обеспечения однородности и воспроизведимости состава и свойств покрытий на полупроводниковых подложках. На настоящий момент времени исследованные направления развития ХОГФ в проточных реакторах не обнаружили перспектив принципиального улучшения конформности тонких пленок для сложных 3D-структур. В части 2 работы будут рассмотрены варианты реализации метода ХОГФ в реакторах с циклическим последовательно-импульсным напуском исходных реагентов, потенциально позволяющих решать задачи улучшения конформности осаждения тонких пленок, в том числе — нитрида кремния.

Список литературы

1. Adams A. C. Dielectric and Polysilicon Film Deposition // In VLSI Technology, 2nd edition. Ed. by S. M. Sze. McGraw-Hill Int. Edition. 1988. P. 233—271.
2. Vasilyev V. Yu. Thin Film Chemical Vapor Deposition in Integrated Circuit Technology: Equipment, Methodology and Thin Film Growth Experience / New York: Nova Science Publishers, Inc.: 2014. 314 p.
3. Васильев В. Ю. Тренды развития методов химического осаждения из газовой фазы тонкопленочных материалов для прецизионных технологий // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 9 (170). С. 37—44.
4. Morosanu C. E. The Preparation, Characterization and Application of Silicon Nitride Films // Thin Solid Films. 1980. Vol. 65, N. 1/2. P. 171—208.
5. Silicon nitride in Electronics. Edited by Rzhanov A. V. Elsevier Science Publishers B. V., 1988. 263 p.
6. Stoffel A., Kovacs F., Kronast W., Muller B. LPCVD against PECVD for micromechanical applications // J. Micro-mech. Microeng. 1996. Vol. 6. P. 1—13.
7. Joshi B. C., Eranna G., Runthala D. P. et al. LPCVD and PECVD silicon nitride for microelectronics technology // Indian J. of Eng. & Mater. Sci. 2000. Vol. 7, N. 4. P. 303—309.
8. Xin Meng, Byun Y.-C., Kim H. S., et al. Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride Thin Films: A Review of Recent Progress, Challenges, and Outlooks // Materials. 2016. N 9. Article ID 1007. 20 p.
9. Kaloyerous A. E., Jove F. A., Jonathan Goff, et al. Review-Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: Trends in Deposition Techniques and Related Applications // Materials. 2016. N 9. Article ID 1007. 20 p.

- tions // ECS J. of Solid State Sci. and Techn. 2017. Vol. 6, N. 10. P. P691—P714.
10. Knolle W. R., Osenbach J. W. The structure of plasma-deposited silicon nitride films determined by infrared spectroscopy // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58, N. 3. P. 1248—1254.
 11. Чернов А. С., Чебанов М. А., Гридин В. А. и др. Исследование закономерностей формирования 3D островковых структур Si (100) при травлении в водном растворе KOH // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 9 (182). С. 34—40.
 12. Эммануэль Н. М., Кнорре Д. Г. Курс химической кинетики. М.: Высшая школа, 1984. 463 с.
 13. Gumper J., Bather W. A., Wedel D. LPCVD Silicon Nitride Uniformity Improvement Using Adaptive Real-Time Temperature Control // IEEE Trans. Semicond. Manuf. 2003. Vol. 16, N. 1. P. 26—35.
 14. Williams K., Brenniman E., Su J., et al. A Variable Batch Size DCS Nitride Using Low-Temperature LPCVD // Solid State Technol. 2007. Vol. 50, N. 8. P. 41—44, 63.
 15. Bagatur'yants A. A., Novoselov K. P., Safonov A. A., et al. Silicon nitride chemical vapor deposition from dichlorosilane and ammonia: theoretical study of surface structures and reaction mechanism // Surface Sci. 2001. Vol. 486. P. 213—225.
 16. Makhviladze T. M., Minushev A. Kh. Advanced atomic-scale simulation of silicon nitride CVD from dichlorosilane and ammonia // Proc. of SPIE. 2010. V. 7521. P. 75211A1—75211A12.
 17. Gardeniers J. G.E., Tilmans H. A.C., Visser C. C. G. LPCVD silicon-rich silicon nitride films for applications in micromechanics, studied with statistical experimental design // J. Vac. Sci. Technol. A. 1996. Vol. 14, N. 5. P. 2879—2892.
 18. Zheng B., Zhou C., Wang Q., et al. Deposition of Low Stress Silicon Nitride Thin Film and Its Application in Surface Micromachining Device Structures // Advances in Materials Science and Engineering. 2013. Vol. 2013. Article ID 835942. 4 p.
 19. Temple-Boyer P., Rossi C., Saint-Etienne E., et al. Residual stress in low pressure chemical vapor deposition SiN_x films deposited from silane and ammonia // J. Vac. Sci. Technol. A. 1998. Vol. 16, N. 4. P. 2003—2007.
 20. Walker K. L., Jardine R. E., Ring M. A., et al. Mechanisms and Kinetics of the Thermal Decompositions of Trichlorosilane, Dichlorosilane, and Monochlorosilane // Int. Journal of Chemical Kinetics. 1988. Vol. 30. P. 69—88.
 21. Walch S. P., Dateo C. E. Thermal Decomposition Pathways and Rates for Silane, Chlorosilane, Dichlorosilane, and Trichlorosilane // J. Phys. Chem. A. 2001. Vol. 105. P. 2015—2022.
 22. Osenbach J. W., Zell J. L., Knolle W. R., et al. Electrical, physical, and chemical characteristics of plasma-assisted chemi-vapor deposited semiminsulating αSiN_x and their use as a resistive field shield for high voltage integrated circuits // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 67, N. 11. P. 6830—6843.
 23. Rosler R. S., Engle G. M. Plasma Enhanced CVD in a Novel LPCVD-type System // Solid State Technol. 1981. Vol. 24, N. 4. P. 172—177.
 24. Levy R. A., Lin X., Grow J. M. Low pressure chemical vapor deposition of silicon nitride using the environmentally friendly tris(dimethylamino)silane precursor // J. Mat. Res. 1996. Vol. 11, N. 6. P. 1483—1488.
 25. Yeh W.-C., Ishihara R., Morishita S., et al. Low-Temperature Chemical-Vapor-Deposition of Silicon-Nitride Film from Hexachloro-Disilane and Hydrazine // Jpn. J. Appl. Phys. 1996. Vol. 35. Part 1. N. 2B. P. 1509—1512.
 26. Lin X., Endisch D., Chen X., Kaloyerous A. Silicon Nitride Films Deposited Using Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1998. Vol. 495. P. 107—112.
 27. Jhansirani K., Dubey R. S., More M. A., et al. Deposition of Silicon Nitride Films using Chemical Vapor deposition for Photovoltaic Applications // Results in Physics 2016. Vol. 6. P. 1059—1063.
 28. Deshpande S. V., Gulari E., Brown S. W., et al. Optical Properties of silicon nitride films deposited by hot filament chemical vapor deposition // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 77, N. 12. P. 6534—6541.
 29. Atwater H. A. Si Passivation and Chemical Vapor Deposition of Silicon Nitride. Final Technical Report: California Institute of Technology. Pasadena. 2007. 39 p.

V. Yu. Vasilev, D. Sc., Professor, vasilev@corp.nstu.ru,
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation,
Deputy Director General, SibIS LLC, Novosibirsk, 630082, Russian Federation

Corresponding author:

Vasilev Vladislav Yu., D. Sc., Professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Deputy Director General, SibIS LLC, Novosibirsk, 630082, Russian Federation, e-mail: vasilev@corp.nstu.ru

Silicon Nitride Thin Film Deposition for Microelectronics and Microsystem Technologies.

Part 1. Processes in Flow Reactors with Thermal Activation

Received on January 12, 2018
Accepted on January 30, 2018

In the first part of review, a status and possible directions of stoichiometric silicon nitride thin film chemical vapor deposition (CVD) technologies devoted to the integrated circuit (IC) and microelectromechanical systems (MEMS) applications are analyzed. Status of stoichiometric silicon nitride thin films production processes with the use of thermal activation of SiH_4 , SiCl_4 , SiH_2Cl_2 and ammonia gas in flow-type low pressure CVD (LPCVD) reactors, as well as directions of their modifications are considered. LPCVD temperature and pressure reductions allow to improve the film conformality on three-dimension (3D) device structures of IC and MEMS devices. Thin film compositions with silicon enrichment allow to obtain the films with reduced mechanical stress for MEMS applications. Some examples of new CVD silicon-based reactants (Si_2Cl_6) as well as new CVD reactor designs are analyzed. All considered directions do not show promise in terms of obtaining the high thin film conformality on complicated 3D devices structures.

Keywords: silicon nitride, thin films, chemical reactions with thermal activation, flow reactors, integrated circuits, microelectromechanical systems

For citation:

Vasilyev V. Yu. Silicon Nitride Thin Film Deposition for Microelectronics and Microsystem Technologies. Part 1. Processes in Flow Reactors with Thermal Activation, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 287–296.

DOI: 10.17587/nmst.20.287-296

Introduction

Thin-film inorganic materials are the base for electronic components manufactured using integrated microelectronics technologies, nano- and microsystem technology. Chronologically, thin films (TF) of silicon dioxide and silicate glasses, silicon nitride, and polycrystalline silicon began firstly to be used in the technology of integrated circuits (IC) [1]. The chemical vapor deposition from the gas phase (CVD) takes the leading place in creation of TF, in which the necessary material is synthesized by chemical reactions directly during the multistage technological cycles of IC manufacturing. The sum of general issues of CVD of thin films with reference to the IC technology is detailed in [2]. In [3], the main results, trends and issues of development of CVD methods of thin films for advanced IC and nano- and microelectromechanical systems (MEMS) are outlined.

Silicon nitride thin films (SNTF) described by the stoichiometric formula Si_3N_4 ($\text{Si:N} = 1:1.33$) are one of the most popular dielectrics in the IC and MEMS technology. The use of SNTF is based on the presence in Si_3N_4 of a number of unique properties, for example, resistance to aggressive chemical acids (hydrofluoric, hot orthophosphoric), differences in plasma etching rates in fluorine-containing gas mixtures from those for silicon dioxide, which ensures selectivity of etching, increased hardness, gettering properties with respect to sodium ions undesirable for IC technology, etc. [4, 5]. The methods and equipment for production of SNTF at CVD by ammonolysis reactions of silicon compounds (reactions with gaseous ammonia, NH_3) have been tested for many years in the mass production of the IC and MEMS. However, development of the integrated technologies poses new tasks to optimization and modification of the existing processes / compositions / properties of SNTF and to development of new methods for CVD of the SNTF. The purpose of this review is to analyze the status and trends in the development of technologies for production of SNTF based on information sources for the last three decades. The main attention is paid to SNTF obtaining, composition and basic physical and chemical properties. Part 1 reviews thermally activated processes in flow CVD reactors.

Composition of the silicon nitride thin films

In the case of the SNTF production by CVD methods, the use of the stoichiometric formula Si_3N_4 is not unambiguous. The composition of the resulting thin film material depends on the initial chemical reagents and the conditions of CVD, the main one being temperature. For example, elements from the initial chemical reagents (chlorine, oxygen, carbon) can present in the SNTF as a residual. However, besides the silicon and nitrogen, the most common component of SNTF is hydrogen, whose source is the starting reagents. The concentration of hydrogen in SNTF can be from several units (high CVD temperatures) to dozens of atomic percent (low CVD temperatures) [5]. This is important for many applications, including for MEMS [6, 7]. Thus, in order to characterize the actual composition of SNTF in a general form, it is more cor-

rect to use the general formula $\text{Si}_x\text{N}_y\text{H}_z$. In the literature, such notations for films as SiN_x [8] and $\alpha\text{-SiN}_x$ [9] for films with a hydrogen concentration less than 5 %, and $\alpha\text{-SiN}_x\text{:H}$ [9] and $\alpha\text{-SiN:H}$ [10] for films with a hydrogen concentration greater than 5 % are encountered. At high-temperature annealing, the concentration of hydrogen in SNTF decreases. Understanding of films' composition can be indirectly, but quickly, made by the value of the refractive index (n): for stoichiometric Si_3N_4 $n = 2.02 \pm 0.02$; the values above correspond to the enrichment of material with the silicon, the values below correspond to the enrichment of the material, as usually, with the oxygen [4, 5].

Industrial technologies for production of SNTF by CVD

Two directions of the CVD processes are used in the integrated technologies for production of materials on semiconductor substrates (disks with diameters up to 300 mm and thickness up to 1 mm).

Direction 1 includes CVD processes at 750...900 °C in "batch" ("group") low-pressure tubular flow reactors with "hot walls" (fig. 1, a) (Low Pressure CVD, LPCVD). The processes are realized due to the thermal activation of chemical reactions of ammonolysis of monosilane or its chlorinated derivatives. The hydrogen concentration in such SNTF is usually less than 5 % [5–7] and they can be considered as stoichiometric; below, these SNTFs are designated as S-SNTFs. Such S-SNTFs are required, for example, for use in the sub-route of IC manufacturing, known as Front-End-of-Line (FEOL), allowing high processing temperatures. In the course of FEOL, the transistor IC structures are formed with elements of their isolation by means of high-temperature oxidation of sites in silicon (Local Oxidation of Silicon, LOCOS), insulating trenches in silicon with their filling with silicon dioxide (Shallow Trench Isolation, STI), insulating regions ("spacer") for the transistors' gates. In MEMS technologies, S-SNTFs are used as protective coatings on silicon, if long-term etching of open silicon regions by anisotropic etching in aqueous solutions of KOH [11] is necessary.

The gross-reactions of ammonolysis of silicon compounds and the main characteristics of the corresponding CVD processes for the production of S-SNTF are given below.

The reaction of ammonolysis of monosilane (SiH_4 , a gas under normal conditions) is described by scheme $3\text{SiH}_4 + 4\text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{H}_2$. The advantage of the process, realized in the range 750...800 °C, pressures around 130 Pa, the ratio $\text{NH}_3/\text{SiH}_4 > \sim 50$, is the lack of accumulation of reaction by-products on the walls of the reactor and the vacuum system. Disadvantages of the process: low productivity (the so-called flow-diffusion LPCVD reactor is needed to increase it, which is a cylindrical tube, inside which a perforated cylindrical cage with substrates is placed [2]); non-uniformity of thickness of S-SNTF on substrates; non-conformality of growth on the relief of IC; macrodefectiveness of S-SNTFs.

The reaction of ammonolysis of tetrachlorosilane (SiCl_4 , a liquid under normal conditions) is described by scheme $3\text{SiCl}_4 + 16\text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{NH}_4\text{Cl}$. The advantages of the

process, carried out in the LCVD at 800...900 °C, pressure of up to several hundred pascals, $\text{NH}_3/\text{SiCl}_4 > \sim 10$: high productivity (100 substrates / process) in a simple cylindrical LPCVD reactor, good homogeneity of S-SNTF and growth conformality on the ICs relief, absence of the macrodefects, possibility of growing of a film with equal and uniform thickness at the same time from both sides of the substrates. Disadvantages: the need to use a gas carrier to supply SiCl_4 vapor (nitrogen, argon); the frequent need for chemical treatment (cleaning) of the reactor and the walls of the vacuum system from precipitation like NH_4Cl .

The growth scheme of S-SNTF for the reaction of dichlorosilane ammonolysis (SiH_2Cl_2 , a gas under normal conditions) is displayed as follows: $3\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + 10\text{NH}_3 \rightarrow \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 6\text{NH}_4\text{Cl} + 6\text{H}_2$. Ammonolysis of SiH_2Cl_2 is a main industrial method for obtaining of S-SNTF for IC and MEMS technologies implemented in cylindrical LPCVD reactor at 700—800 °C, pressure of about 50 Pa, $\text{NH}_3/\text{SiH}_2\text{Cl}_2 > \sim 5$. Advantages are generally similar to SiCl_4 , but the amount of undesirable by-products is twice as little.

The considered methods of S-SNTF preparation have good theoretical description. Peculiarities of the growth kinetics of S-SNTF in CVD with participation of SiH_4 , SiCl_4 and SiH_2Cl_2 are systematized and quantitatively described in [2]. The CVD processes are realized in the kinetic region, which is characterized by a linear dependence in the "Arrhenius coordinates" (logarithm of the reaction rate constant versus the reciprocal absolute temperature). A scheme of a universal two-stage sequential reaction with the stages of formation of an intermediate product (IP) in the gas phase and its consumption on the substrate surface is proposed: "Initial reagents \rightarrow IP \rightarrow S-SNTF + by-products". According to the ammonolysis reaction of SiH_4 , the growth of S-SNTF is described as being limited by the stage of IP's homogeneous formation in the gas phase (it was assumed that this could be, for example, SiH_2 , SiH_3 , nitrogen-containing IP, etc. [5]). In this case, the diffusion of slowly formed IP to the surface of substrates in the bulk reactor (fig. 1, a) is critical and determines the above disadvantages of the CVD process. The CVD processes by the ammonolysis reactions of SiH_2Cl_2 and SiCl_4 with practically identical kinetic characteristics in LPCVD reactor are described as being limited by the stage of consumption of IP on the substrate surface (heterogeneous stage). As the IPs in this case there are the compounds $\text{SiH}_2\text{ClNH}_2$ and SiCl_3NH_2 rapidly produced in the gas phase by the addition of ammonia to silicon tetrachloride with elimination of HCl . As a result, a constant concentration of IP is established in the CVD reactor, and the consequence of the CVD process limiting by a heterogeneous stage results in the independence from diffusion processes. As a consequence, the process proceeds with small (about 1 %) non-uniformity of the thickness and properties of S-SNTF films in the LPCVD reactor, and also with a very high (>90 %) conformance of their application to complex IC reliefs. The quantitative description of the S-SNTF growth patterns in LPCVD reactor by means of the kinetics of successive irreversible first-order reactions in so-called "closed systems" [12] allowed to adequately explain the set of observed similarities and differences in S-SNTF growth and suggest approaches for process modernization.

Direction 2 includes variants of technological processes at low temperatures (less than 450 °C). The processes are carried out, as a rule, from monosilane, ammonia and nitrogen at different ratios using plasma activation. This direction is real-

ized, as a rule, in individual type flow reactors, for example, a diode with cold walls, shown in fig. 1, b. In foreign literature, such reactors are called "Plasma-Enhanced CVD, PECVD". In the case of PECVD, the non-stoichiometric SNTF are being formed, the specific composition of which depends on the temperature, the nature of the reagents and the composition of the vapor-gas mixture, the density of high-frequency power, the remoteness of the plasma source from the substrate, etc. In contrast to the high-temperature CVD processes of S-SNTF, there are no adequate gross reactions in the literature for the plasma processes. Below, in order to distinguish such non-stoichiometric materials of high-temperature S-SNTFs, the author uses the term "silicon-nitrogen-hydrogen-containing thin films, SiNH-TF", that is identical to designations $\alpha\text{-SiN}_x\text{H}$ [9] and $\alpha\text{-SiN:H}$ [10]. High-temperature annealing of SiNH-TF leads to loss of hydrogen and, accordingly, the composition of such films can approach a stoichiometric type. The PECVD processes are only used in a low-temperature sub-route of IC manufacturing, known as the Back-End-Of-Line (BEOL), for example, for passivation of ICs, or as stop layers for etching.

The fundamental drawback of all PECVD processes is strong non-conformity of the films, which is a fundamental limitation on the applicability in promising devices. This question is examined in details in the monograph [2]. Plasma methods for thin films obtaining are not to be strictly chemical processes, they are not described by adequate schemes of processes, and depend to a large extent on the equipment used. In this regard, such films are of independent interest and are beyond the scope of this review.

Directions for improvement of the technologies of SNTF by CVD

For flow reactors, four directions of the development of thermally activated processes of CVD SNTF can be identified.

Improvement of the existing industrial processes for production of S-SNTF in flow LPCVD reactors. The improvements involves the optimization of the basic regimes of processes (mainly the process of dichlorosilane ammonolysis), the most often — temperature, pressure, and gas flow values [13, 14]. The aim is to improve the characteristics of the process for production of S-SNTF, for example, to reduce the non-uniformity of the film thickness on the substrates, to increase the repeatability of the process, etc.; the composition and properties of the material remain unchanged. Improving the conformality of TF deposition on structures with increased aspect ratios for heterogeneous processes can be optimized using the approach called the "Thiele criterion (modulus)" (taken from the theory of heterogeneous catalysis, relates diffusion processes and the rate constant of a heterogeneous reaction); in general form is achieved by reducing of pressure and temperature of the CVD processes [2]. There are also examples of modeling of these process [15, 16].

Modernization of the processes for obtaining of films in flow CVD reactors. Under the modernization (as a rule, with respect to the base process), the principal changes of the parameters of CVD are meant, but without changing the initial reagents or the method of feeding the reagents in CVD reactor, in order to search for new compositions and material properties. For MEMS, such properties are mechanical stress [17, 18]. In [17], silicon-enriched films with reduced values of mechanical stress were obtained in flow LPCVD under

other invariable conditions 800...850 °C and 30...70 Pa) by changing $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ ratio to 14 (with strong enrichment of the gas mixture with dichlorosilane). Further, such films are referred to as "silicon-enriched SNTF" or SE-SNTF. As a result of increase in the $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ ratio in the above-mentioned limits, the refractive index of the films varied from a typical value for S-SNTF ~2.0 to silicon-enriched ~2.7. At the same time, the mechanical stress in SE-SNTF decreased steadily from 1.2...1.4 GPa to ~−0.15 GPa. Similar values of mechanical stress near 0.13 GPa are presented in [18], where the investigations were carried out at 835...875 °C, 39 Pa pressure and a fixed value of gas flow ratio $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3 = 10$. The dissolution rates for SE-SNTF in standard solutions of IC solutions: pickling for oxide — Buffered Oxide Etch, BOE (25 °C), 40 % HF (25 °C) and H_3PO_4 (160 °C) were about 2.5–3, and KOH (50 °C) — about 5 times smaller than those for S-SNTF. Similar studies were performed [19] for monosilane and ammonia in LPCVD reactor in the range of 725...775 °C and the ratio $\text{NH}_3/\text{SiH}_4 = 0.2...1.6$. The changes in the mechanical stress in the films were from −0.5 GPa to 0.9 GPa.

The authors of these studies noted that when SE-SNTF were obtained, the uniformity of the films deteriorated strongly along the length of the LPCVD reactor work area. In the opinion of the author of the review, the reason is that at low ratios of ammonia to the silicon-containing starting reagent and high temperatures of the CVD create conditions for the parallel development of the pyrolysis (thermal decomposition) reactions of the initial silicon-containing reagents SiH_4 and SiH_2Cl_2 . The possibility of thermal decomposition of these reagents under similar experimental conditions of the components was investigated in [20, 21]. Simultaneously, the pyrolysis reactions that occur cause an accumulation of by-product concentrations along the length of the LPCVD reactor reaction zone. Thus, when SE-SNTF is deposited in LPCVD reactor, the concentrations of the initial reagents and by-products will differ in each conventional section of the reactor working area. Accordingly, along the length of the reactors, the composition and properties of SE-SNTF will be different, indicating the inapplicability of such processes and reactors for production of MEMS.

The author believes, that the plasma deposition at temperature of about 400°C could serve the best one for preparation of SE-SNTF. Such possibility, in particular, the results of [22] indicate, where the authors investigated the synthesis and properties of semi-insulating polycrystalline silicon films obtained in LPCVD reactor with an electrode system (details in [23]) with the ratio $\text{NH}_3/\text{SiH}_4 = 0.5...5$. Mechanical stresses of such films close to SE-SNTF were in the compression range in the band from −0.9 to −0.3 GPa. The advantage of this process is the absence of any thermally activated ammonolysis and thermal decomposition reactions at low deposition temperatures, i.e. the patterns of TF growth are mainly determined by the design of the equipment and the characteristics of the plasma discharge. Moreover, production of films in individual plasma reactors (fig. 1, b) can give even more uniform coatings, although the PECVD processes have limitations on the conformality of deposition.

New reagents for production of SNTF in flow CVD reactors. The general aim of this type of research was to search for reagents that significantly reduce the deposition temperature. The authors [24] studied SNTF obtained in a "hot-wall" LPCVD reactor of tris(dimethylamino)silane $((\text{CH}_3)_2\text{N})_3\text{SiH}$

and ammonia at temperature of 650...900 °C and pressure less than 130 Pa. The authors sought the so-called "environment friendly" — a silicon-containing reagent capable of substituting dangerous (SiH_4) and corrosive (SiH_2Cl_2 , SiCl_4) reagents. The growth rate of films in the range of 650...800 °C and pressure 20...80 Pa with the ratio $\text{NH}_3/((\text{CH}_3)_2\text{N})_3\text{SiH}$ from 1 to 10 was 0.3 to 9.0 nm/min. The authors calculated, that the optimum deposition temperature should be 800 °C and the ratio $\text{NH}_3/((\text{CH}_3)_2\text{N})_3\text{SiH} = 10$. In the films, a carbon with a concentration of up to 5 at. % and hydrogen (concentration not shown) were detected. The conformity of coatings was evaluated for a structure with a depth of 1 μm and a width of 0.75 μm at a level of only 70 %. In [25], the possibility of growth of $\text{SiN}_x:\text{H}$ films at 250...500 °C was studied with the participation of a mixture of the oligomer Si_2Cl_6 and hydrazine N_2H_4 . The deposition rate was about 4 nm/min, and the refractive index was 1.67...1.75. The precipitation rate was sharply reduced at temperatures below 350 °C, which was explained by the formation of NH_4Cl -like materials. The concentration of hydrogen was estimated at 30 at. %. The authors of [26] investigated the growth of TF from SiI_4 and ammonia in an atmospheric reactor at 350...550 °C. The growth rates were about 80 nm/min, iodine concentration in the films was 0.8...4.2 at. %, hydrogen concentration — about 30 at.%. The conformity of TF was estimated by the authors better than 85 % on a structure with a size of 1.6 μm per 1 μm, however, with inclined walls, which makes it impossible to make adequate comparative estimates. In [27], the growth of films from hexamethydisiloxane $(\text{CH}_3)_3\text{SiOSi}(\text{CH}_3)_3$ and ammonia at atmospheric pressure and 750...850 °C was studied. At optimum deposition temperature of 800 °C, the achieved refractive index of 1.88 conformed more to silicon oxynitride.

New designs of flow reactors for production of SNTF by CVD. In this section, the author would like to focus on "catalytic CVD", in the foreign literature called Catalytic CVD, Cat-CVD or Hot-Wire CVD (HWCVD). The essence of the method is that in flow reactors the diluted with an inert gas reaction mixture of ammonia with disilane Si_2H_6 [28] or SiH_4 [29] passes first over a tungsten wire/tape heated to a high temperature (about 2000 °C), and then flows to a substrate at a temperature of about 300 °C. In this case, the shape of the substrates and their dimensions can vary greatly, as well as the shape and position of the tungsten filament. At deposition, high rates of the order of 80...170 nm/min are achieved [28]. A detailed report on this type of film production with reference to creation of the photovoltaic devices of various sizes and shapes is given in [29]. According to the author of the review, such a method, as well as other methods of CVD with activation of reagents, can hardly be effective for solving the issues of creating conformal coatings in IC and MEMS devices with high-aspect structures.

Conclusion

Continuous improvement and development of IC and MEMS technologies poses challenges for thin film coating technologies. The main of them include the production of films of a given composition and properties, as well as the conformity of film growth on the high-aspect structures of modern devices. The review made it possible to single out the following trends in development of technologies for production of SNTF during the thermal activation of reagents in flow reactors. These include: search for new initial silicon-contain-

ing reagents, decrease in the temperature of the CVD processes, and search for new designs of CVD reactors. The solutions discussed in the literature for modifying the composition of thin films to obtain new properties required for MEMS applications require careful analysis of the possibilities of their hardware implementation to ensure homogeneity and reproducibility of the composition and properties of coatings on semiconductor substrates.

At the present time, the investigated directions of CVD development in flow reactors have not found any prospects for a principal improvement in the conformality of thin films for complex 3D structures. Part 2 of the review will consider options for implementation of the CVD method in reactors with cyclic sequential pulse startup of initial reagents potentially capable of solving the issues of improving the conformality of the thin films deposition, including silicon nitride.

References

1. Adams A. C. Dielectric and Polysilicon Film Deposition, *VLSI Technology, 2nd edition*. Ed. by S. M. Sze, McGraw-Hill Int. Edition, 1988, pp. 233–271.
2. Vasilyev V. Yu. *Thin Film Chemical Vapor Deposition in Integrated Circuit Technology: Equipment, Methodology and Thin Film Growth Experience*, New York, Nova Science Publishers, Inc., 2014. 314 p.
3. Vasilyev V. Yu. Trendy razvitiya metodov himicheskogo osazhdnenija iz gazovoj fazy tonkoplenochnyh materialov dlja precizionnyh tehnologij, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2014, no. 9 (170), pp. 37–44 (in Russian).
4. Morosanu C. E. The Preparation, Characterization and Application of Silicon Nitride Films, *Thin Solid Films*, 1980, vol. 65, no. 1, 2, pp. 171–208.
5. *Silicon nitride in Electronics* / Ed. by Rzhanov A. V., Elsevier Science Publishers B.V, 1988, 263 p.
6. Stoffel A., Kovacs F., Kronast W., Muller B. LPCVD against PECVD for micromechanical applications, *J. Micromech. Microeng.*, 1996, vol. 6, pp. 1–13.
7. Joshi B. C., Eranna G., Runthala D. P. et al. LPCVD and PECVD silicon nitride for microelectronics technology, *Indian J. of Eng. & Mater., Sci.*, 2000, vol. 7, no. 4, pp. 303–309.
8. Xin Meng, Byun Y.-C., Kim H. S., et al. Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride Thin Films: A Review of Recent Progress, Challenges, and Outlooks, *Materials*. 2016, no. 9, Article ID 1007. 20 p.
9. Kaloyeros A. E., Jove F. A., Jonathan Goff, et al. Review-Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: Trends in Deposition Techniques and Related Applications, *ECS J. of Solid State Sci. and Techn.*, 2017, vol. 6, no. 10, pp. P691–P714.
10. Knolle W. R., Osenbach J. W. The structure of plasma-deposited silicon nitride films determined by infrared spectroscopy, *Appl. Phys.*, 1985, vol. 58, no. 3, pp. 1248–1254.
11. Chernov A. S., Chebanov M. A., Gridchin V. A., et al. Issledovanie zakonomernostej formirovaniya 3D ostrovkovyh struktur Si (100) pri travlenii v vodnom rastvore KON, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2015, no. 9 (182), pp. 34–40 (in Russian).
12. Emmanuel N. M., Knorre D. G. *Kurs himicheskoy kinetiki*, Moscow, Vysshaja shkola, 1984, 463 p. (in Russian).
13. Gumper J., Bather W. A., Wedel D. LPCVD Silicon Nitride Uniformity Improvement Using Adaptive Real-Time Temperature Control, *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, 2003, vol. 16, no. 1, pp. 26–35.
14. Williams K., Brenniman E., Su J., et al. A Variable Batch Size DCS Nitride Using Low-Temperature LPCVD, *Solid State Technol.*, 2007, vol. 50, no. 8, pp. 41–44, 63.
15. Bagatur'yants A. A., Novoselov K. P., Safonov A. A., et al. Silicon nitride chemical vapor deposition from dichlorosilane and ammonia: theoretical study of surface structures and reaction mechanism, *Surface Sci.*, 2001, vol. 486, pp. 213–225.
16. Makhvilaadze T. M., Minushev A. Kh. Advanced atomic-scale simulation of silicon nitride CVD from dichlorosilane and ammonia, *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7521, pp. 75211A1–75211A12.
17. Gardeniers J. G. E., Tilmans H. A. C., Visser C. C. G. LPCVD silicon-rich silicon nitride films for applications in micromechanics, studied with statistical experimental design, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1996, vol. 14, no. 5, pp. 2879–2892.
18. Zheng B., Zhou C., Wang Q., et al. Deposition of Low Stress Silicon Nitride Thin Film and Its Application in Surface Micromachining Device Structures, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, vol. 2013, Article ID 835942. 4 p.
19. Temple-Boyer P., Rossi C., Saint-Etienne E., et al. Residual stress in low pressure chemical vapor deposition SiN_x films deposited from silane and ammonia, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1998, vol. 16, no. 4, pp. 2003–2007.
20. Walker K. L., Jardine R. E., Ring M. A., et al. Mechanisms and Kinetics of the Thermal Decompositions of Trichlorosilane, Dichlorosilane, and Monochlorosilane, *Int. Journal of Chemical Kinetics*, 1988, vol. 30, pp. 69–88.
21. Walch S. P., Dateo C. E. Thermal Decomposition Pathways and Rates for Silane, Chlorosilane, Dichlorosilane, and Trichlorosilane, *J. Phys. Chem. A*, 2001, vol. 105, pp. 2015–2022.
22. Osenbach J. W., Zell J. L., Knolle W. R., et al. Electrical, physical, and chemical characteristics of plasma-assisted chemical-vapor deposited semiminsulating αSiN_x :H and their use as a resistive field shield for high voltage integrated circuits, *J. Appl. Phys.*, 1990, vol. 67, no. 11, pp. 6830–6843.
23. Rosler R. S., Engle G. M. Plasma Enhanced CVD in a Novel LPCVD-type System, *Solid State Technol.*, 1981, vol. 24, no. 4, pp. 172–177.
24. Levy R. A., Lin X., Grow J. M. Low pressure chemical vapor deposition of silicon nitride using the environmentally friendly tris(dimethylamino)silane precursor, *J. Mat. Res.*, 1996, vol. 11, no. 6, pp. 1483–1488.
25. Yeh W.-C., Ishihara R., Morishita S., et al. Low-Temperature Chemical-Vapor-Deposition of Silicon-Nitride Film from Hexachloro-Disilane and Hydrazine, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, vol. 35, part 1, no. 2B, pp. 1509–1512.
26. Lin X., Endisch D., Chen X., Kaloyeros A. Silicon Nitride Films Deposited Using Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1998, vol. 495, pp. 107–112.
27. Jhansirani K., Dubey R. S., More M. A., et al. Deposition of Silicon Nitride Films using Chemical Vapor deposition for Photovoltaic Applications, *Results in Physics*, 2016, vol. 6, pp. 1059–1063.
28. Deshpande S. V., Gulari E., Brown S. W., et al. Optical Properties of silicon nitride films deposited by hot filament chemical vapor deposition, *J. Appl. Phys.*, 1995, vol. 77, no. 12, pp. 6534–6541.
29. Atwater H. A. Si Passivation and Chemical Vapor Deposition of Silicon Nitride. Final Technical Report: California Institute of Technology. Pasadena. 2007. 39 p.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 621.3.049.771.14

DOI: 10.17587/nmst.20.297-302

А. С. Шалимов, канд. техн. наук, науч. сотр., доц., e-mail: 85e@mail.ru,
С. П. Тимошенков, д-р техн. наук, проф., директор Института НМСТ МИЭТ, e-mail: spt@miee.ru,
Б. М. Симонов, канд. техн. наук, доц., e-mail: serborsel@mail.ru, **А. М. Шишов**, инженер,
e-mail: shishov.miet@mail.ru, **М. С. Головинский**, инженер, e-mail: maxim1112010@mail.ru,
Р. О. Собанин, инженер, e-mail: rusl.sobanin2011@gmail.com,
Институт НМСТ Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт
электронной техники", Москва, Россия

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Поступила в редакцию 11.10.2017

Предложена методика расчета надежности чувствительного элемента микроэлектромеханического гироскопа, в результате которой были рассчитаны значения средней наработки на отказ и полного назначенного срока службы. Данная методика полезна на дальнейшем этапе разработки МЭМС-гироскопов и обеспечивает соответствие характеристик готового изделия согласно техническому заданию.

Ключевые слова: преобразователь угловой скорости, МЭМС-гироскоп, чувствительный элемент, самокалибровка датчиков

Введение

В настоящей работе изложены результаты расчета надежности чувствительного элемента микроэлектромеханического гироскопа (ЧЭ ММГ). В ходе расчета выполнены следующие виды работ:

- обоснование критерия отказа ЧЭ ММГ исходя из особенностей конструкции;
- обоснование подхода для оценки надежности ЧЭ ММГ;
- приведение конструкции к типовой расчетной модели;
- выбор и обоснование числовых значений, необходимых для расчета констант;
- расчет средней наработки до отказа ЧЭ ММГ;
- расчет полного назначенного срока службы ЧЭ ММГ.

Обоснование критерия отказа ЧЭ ММГ исходя из особенностей конструкции

Как известно, существует множество видов и механизмов отказов, возникающих при воздействии факторов внешней среды (таких как влажность,

тепло, удары, вибрация, радиация, статическое электричество и др.) на чувствительные элементы микроэлектромеханических устройств (МЭМС-устройств), к которым относится рассматриваемая конструкция ЧЭ ММГ.

Эти факторы приводят к следующим эффектам:

- сорбция молекул воды;
- коробление деталей конструкции;
- появление посторонних микрочастиц (загрязнение);
- термоусадочные и остаточные термоупругие напряжения;
- паразитная вибрация;
- износ;
- усталость;
- механическая поломка;
- слипание (stiction) элементов конструкции;
- нарушение адгезии;
- накопление зарядов;
- увеличение паразитных емкостей;
- электрические замыкания и обрывы проводников.

Одним из основных эффектов, имеющих наибольшее влияние на надежность анализируемой конструкции ЧЭ ММГ, является слипание ее кантileверов между собой и с другими частями конструкции.

Таким образом, в качестве критерия отказа для последующего расчета был использован именно этот эффект.

Обоснование подхода для оценки надежности ЧЭ ММГ

Общепринятые модели надежности в работах [1–3] являются методологически ущербными, поскольку рассматривают только вероятность отказа в форме, не зависящей от времени. Поэтому расчет таких показателей надежности, как вероятность бесштабной работы, интенсивность отказов и средняя наработка на отказ, невозможен в принципе, поскольку, используя данные модели, можно делать вывод лишь о геометрической вероятности отказа, т.е. оперировать в рамках теории случайных величин, но не случайных процессов, опиравшихся потоками отказов. В связи с этим представляется целесообразным использовать топологическую теорию надежности, в которой вводится структура времени. Одной из эмпирических моделей, реализованных на основе топологической теории надежности, является метод аналогий на основе π -моделей из классической статистической теории надежности с набором коэффициентов:

- K_1 — коэффициент влияния повышенной температуры;
- K_2 — коэффициент влияния емкости;
- K_3 — коэффициент влияния жесткости электрического режима;
- K_4 — коэффициент влияния последовательного сопротивления;
- K_5 — коэффициент влияния уровня приемки;
- K_6 — матрица коэффициентов влияния группы аппаратуры (коэффициенты эксплуатации);
- Λ_{61} — базовая интенсивность отказов конденсаторной структуры (КС); для данного типа структуры значение интенсивности отказов составляет $0,037 \cdot 10^{-6}$ ч [4];

- Λ_{62} — базовая интенсивность отказов пружинного подвеса (ПП); для данного типа структуры значение интенсивности отказов составляет $0,041 \cdot 10^{-6}$ ч [4].

Приведение конструкции к типовой расчетной модели

Структурная схема надежности ЧЭ ММГ была получена на основании тех параметров конструкции (см. рисунок), которые оказывают наибольшее влияние на конечный результат:

- в конструкции присутствует 280 КС, образованных кантileверами;
- все КС закреплены с помощью четырех пружинных подвесов (ПП).

Тогда выражение для оценки средней наработки на отказ τ будет иметь вид:

$$\tau = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2},$$

где τ_1 — средняя наработка на отказ подсистемы КС:

$$\tau_1 = (280 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot \Lambda_{61})^{-1} \text{ ч},$$

τ_2 — средняя наработка на отказ подсистемы ПП:

$$\tau_2 = (4\Lambda_{62})^{-1} \text{ ч.}$$

Выбор и обоснование числовых значений, необходимых для расчета констант

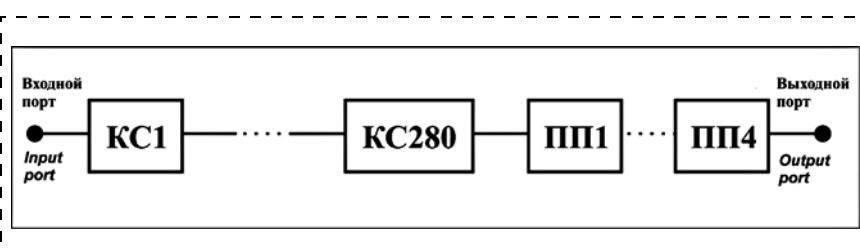
Далее следует определить значения коэффициентов K_1, \dots, K_6 в соответствии с данными из справочников и реальными данными технологических режимов.

В соответствии с результатами проведенных экспериментов емкость между каждым электродом датчика угла (или момента) по оси первичных колебаний и ротором составляет $(2 \pm 0,5)$ пФ, емкость между каждым электродом датчика угла по оси вторичных колебаний и ротором составляет $(2,75 \pm 0,5)$ пФ, а емкость между каждым электродом датчика момента по оси вторичных колебаний и ротором составляет $(0,8 \pm 0,2)$ пФ. Наихудшим,

с точки зрения надежности, будет являться случай, в котором емкость достигает своего максимального значения, т.е. $2,8$ пФ. В справочнике значений коэффициентов [5] для учета влияния емкости (коэффициент K_2) значение данного коэффициента рассчитывается согласно выражению

$$K_2 = 0,291 C^{0,085},$$

где C — емкость, пФ.



Структурная схема надежности ЧЭ ММГ

Block diagram of reliability of SE MMG

Таким образом, значения коэффициентов, использованные в расчете, составляют:

- $K_1 = 2,66$ (при повышенной температуре эксплуатации, равной $+85^{\circ}\text{C}$, в соответствии с ТЗ);
- $K_2 = 0,318$;
- $K_3 = 1,01$;
- $K_4 = 1$;
- $K_5 = 1$;
- $K_6 = 0,5$ (1-я эксплуатационная группа);
- $K_6 = 1$ (2-я эксплуатационная группа);
- $K_6 = 7$ (3-я эксплуатационная группа);
- $K_6 = 10$ (4-я эксплуатационная группа);
- $K_6 = 12$ (5-я эксплуатационная группа);
- $K_6 = 15$ (6-я эксплуатационная группа);
- $K_6 = 20$ (7-я эксплуатационная группа);
- $K_6 = 40$ (8-я эксплуатационная группа);
- $K_6 = 50$ (9-я эксплуатационная группа).

Расчет средней наработки до отказа ЧЭ ММГ

В рамках данного расчета были рассмотрены все известные коэффициенты эксплуатации (K_6), характеризующие условия работы прибора [6–8]:

- работа на геостационарной орбите (без учета старта, самая легкая, 1-я эксплуатационная группа, характеризуемая значением 0,5);
- два вида грузового наземного транспорта;

- три вида морского транспорта;
- три вида авиационной техники (третья группа является самой жесткой, девятой по счету, характеризуется значением 50 и соответствует также режиму работы устройства в условиях старта космических аппаратов).

Таким образом, расчетные значения средней наработки на отказ ЧЭ ММГ для каждой из перечисленных эксплуатационных групп аппаратуры могут быть представлены в виде табл. 1.

Расчет полного назначенного срока службы ЧЭ ММГ

Далее, в соответствии с ТЗ, конструкция ЧЭ ММГ должна иметь полный назначенный срок службы, равный пяти годам (43 800 ч).

Для подтверждения указанного параметра следует рассчитать вероятность бессбоиной работы (ВБР) для каждой эксплуатационной группы аппаратуры:

$$P = e^{-\left(\frac{43800}{\tau}\right)}.$$

Результаты расчета представлены в табл. 2.

Согласно общепринятой практике при расчете параметров надежности критерий годности в отношении ВБР определяется из следующих соображений: в случае равенства срока эксплуатации и вре-

Таблица 1
Table 1

Значения средней наработки на отказ ЧЭ ММГ для различных эксплуатационных групп
Values of the mean time between failures of SE MMG for various operational groups

Эксплуатационная группа аппаратуры <i>Operational group of equipment</i>	1	2	3	4
K_{6i} τ_i , ч τ_p , h	0,5 217 890	1 110 927	7 16 098	10 11 277
Эксплуатационная группа аппаратуры <i>Operational group of equipment</i>	5	6	7	8
K_{6i} τ_i , ч τ_p , h	12 9401	15 7523	20 5644	40 2823
				50 2259

Таблица 2
Table 2

Значения ВБР ЧЭ ММГ для различных эксплуатационных групп
PNFO values of SE MMG for various operational groups

Группа аппаратуры <i>Equipment group</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вероятность бессбоиной работы, % <i>Probability of no-failure operation, %</i>	81,8	67,4	6,58	2,06	0,95	0,3	0,043	$1,83 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$

мени наработка на отказ минимально допустимое значение ВБР принимается равным 63 % (что соответствует доверительному интервалу $\pm 1\sigma$). В то же время очевидно, что максимальное значение составляет 100 % (или близко к нему). Для новых изделий, технология производства которых не может быть отнесена к крупносерийной, в качестве допустимого значения ВБР принимают 80 %.

Заключение

В рамках текущей экспериментальной работы был проведен расчет надежности ЧЭ ММГ. Была выбрана и обоснована необходимая методика расчета полученных числовых значений. Как результат определены значения средней наработки на отказ и полного назначенного срока службы, которые представлены в виде таблиц.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по договору № 02.G25.31.0200 от 27 апреля 2016 года при выполнении проекта 2015-218-07-052 "Исследование и разработка МЭМС-гирокопа для навигационных систем нового поколения".

Список литературы

1. Xingguo Xiong. Built-in Self-test and Self-repair for Capacitive MEMS Devices. Dissertation. Universitet Cincinnati (China), 2005. P. 83—126.
2. Stark B. MEMS Reliability Guidelines for Space Application. California: NASA, 1999. 285 p.
3. Zhao Y. Stiction and Anti-Stiction in MEMS and NEMS. Acta Mechanical (English Series). 2003. Vol. 19, N. 1, pp. 1—10.
4. Тимошенков С. П., Симонов Б. М., Горощко В. Н. Основы теории надежности: учебник и практикум для академического бакалавриата. Сер. Бакалавр. Академический курс. М.: Изд-во Юрайт, 2015. С. 192—195.
5. Автоматизированная система расчета надежности ЭРИ зарубежного производства (ACRH-2004). ОАО РНИИ ЭлектронСтандарт, 2004.
6. Тимошенков С. П., Заводян А. В., Симонов Б. М., Горощко В. Н. Оценка и обеспечение надежности изделий микро- и наноэлектроники, микросистемной техники / Часть 1: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2012. 288 с.
7. MIL-HDBK-217F. Military Handbook. Reliability Prediction of electronic Equipment.
8. Семенов А. Н., Шалимов А. С., Зуев Е. В. Исследование возможности создания на БМК 5503 микросхемы емкостного преобразователя линейного ускорения // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 11. С. 49—51.

A. S. Shalimov, Ph. D., Researcher, Associate Professor, 85e@mail.ru, S. P. Timoshenkov, D. Sc., Professor, Director of Institute NMST MIET, spt@miee.ru, B. M. Simonov, Ph. D., Associate Professor, serborsel@mail.ru, A. M. Shishov, Engineer, shishov.miet@mail.ru, M. S. Golovinsky, Engineer, maxim1112010@mail.ru, R. O. Sobanin, Engineer, rusl.sobanin2011@gmail.com, NMST Institute of National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, 124498, Russian Federation

Corresponding author:

Shalimov Andrey S., Ph. D., Researcher, Associate Professor, NMST Institute of National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, 124498, Russian Federation, e-mail: 85e@mail.ru

Calculation of Reliability of the Sensitive Element of a MEMS Gyroscope

Received on October 11, 2017
Accepted on November 06, 2017

The author proposed a technique for calculation of the reliability of the sensitive element of a microelectromechanical gyroscope, due to which the values of the mean time between failures and the total specified lifetime were calculated. This technique will be useful for the further development of the MEMS gyroscopes and will ensure that the characteristics of the finished product meet the requirements specification.

Keywords: angular speed transducer, MEMS gyroscope, sensitive element, self-calibration sensors, capacitive gyroscope, capacitance-to-voltage converter, comb structure

For citation:

Shalimov A. S., Timoshenkov S. P., Simonov B. M., Shishov A. M., Golovinsky M. S., Sobanin R. O. Calculation of Reliability of the Sensitive Element of a MEMS Gyroscope, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 297—302.

DOI: 10.17587/nmst.20.297-302

Introduction

This work presents the results of the calculation of reliability of the sensitive element of a microelectromechanical gyroscope (SE MMG). During the calculation the following kinds of works were done:

- substantiation of the criterion of failure of SE MMG, proceeding from the specific features of the design;
- substantiation of the approach for estimation of the reliability of SE MMG;
- reduction of the design to a typical design model;
- selection and substantiation of the numerical values, necessary for calculation of the constants; calculation of the mean time between failures of SE MMG; calculation of the full specified lifetime of SE MMG.

Substantiation of the failure criterion of SE MMG proceeding from the specific features of the design

As is known, there many kinds and mechanisms of the failures, which appear under the influence of the environmental factors (such as humidity, heat, blows, vibration, radiation, static electricity, etc.) on the sensitive elements of the microelectromechanical devices (MEMS devices), to which the considered design (SE MMG) belongs.

These factors lead to the following effects:

- sorption of the water molecules;
- buckling of the parts of the design;
- appearance of extraneous microparticles (pollution);
- thermoshrinkable and residual thermoelastic stresses;
- parasitic vibration;
- tear and wear;
- fatigue;
- mechanical break;
- stiction of the design elements;
- adhesion infringement;
- accumulation of charges;
- increase of the parasitic capacities;
- electric short circuits and breakages of the conductors.

One of the main effects directly related to and having the greatest influence on the reliability of the analyzed design of SE MMG is stiction of its cantilevers to each other and to the other parts of the design.

So, exactly this effect was used as a failure criterion for the subsequent calculation.

Substantiation of the approach for estimation of reliability of SE MMG

The generally accepted models of reliability in the works [1–3] are methodologically defective, because they consider only a probability of failure in a form, not dependent on time. Therefore, a calculation of such indexes of reliability, as a probability of no-failure operation, intensity of failures and mean time between failures are impossible in principle, because, if we use the given models, we can draw a conclusion only about a geometrical probability of a failure, that is, we can operate only within the framework of the theory of the random values, but not of the random processes, which con-

trol the flow of the failures. In this connection it seems to be expedient to use the topological theory of reliability, in which the time structure is introduced. One of the empirical models realized on the basis of the topological theory of reliability is the method of analogies on the basis of π -models from the classical statistical theory of reliability with a set of coefficients:

- K_1 — coefficient of influence of the elevated temperature;
- K_2 — coefficient of influence of the capacity;
- K_3 — coefficient of influence of the rigidity of an electric mode;
- K_4 — coefficient of influence of the series resistance;
- K_5 — coefficient of influence of the level of acceptance;
- K_6 — matrix of the coefficients of influence of a group of equipment (coefficients of operation);
- Λ_{61} — base failure rate of the condenser structure (CS): for the given type of the structure the value of the failure rate is $0.037 \cdot 10^{-6}$ h [4];
- Λ_{62} — base failure rate of the spring suspension (SS): for the given type of the structure the value of the failure rate is $0.041 \cdot 10^{-6}$ h [4].

Reduction of the design to the typical calculated model

The block diagram of reliability of SE MMG was received on the basis of those design parameters (see figure), which make the greatest impact on the end result:

- in the design there are 280 CS, formed by the cantilevers;
- all the CS are fixed by means of four spring suspensions (SS).

Then the expression for estimation of the mean time between failures τ will look like the following:

$$\tau = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2},$$

where: τ_1 — mean time between failures of CS subsystem:

$$\tau_1 = (280 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot \Lambda_{61})^{-1} \text{ h},$$

τ_2 — mean time between failures of SS subsystem:

$$\tau_2 = (4\Lambda_{62})^{-1} \text{ h}.$$

Selection and substantiation of the numerical values, necessary for calculation of the constants

Then, it is necessary to define the values of coefficients K_1, \dots, K_6 according to the data from the directories and the real data of the technological modes.

According to the results of the conducted experiments, the capacity between each electrode of the sensor of angle (or moment) on the axis of the primary fluctuations and the rotor is equal to (2 ± 0.5) pF, the capacity between each electrode of the angle sensor on the axis of the secondary fluctuations and the rotor equals to (2.75 ± 0.5) pF, while the capacity between each electrode of the moment sensor on the axis of the secondary fluctuations and the rotor is (0.8 ± 0.2) pF. From the point of view of reliability, the worst is the case, in

which the capacity reaches its maximal value, i.e. 2.8 pF. In the directory of the values of coefficients [5], for taking into account the influence of the capacity (coefficient K_2), the value of the given coefficient is calculated according to the following expression:

$$K_2 = 0.291 C^{0.085},$$

where: C — capacity, pF.

Thus, the values of the coefficients, used in the calculation, are the following:

- $K_1 = 2.66$ (at the elevated temperature of the operation equal to +85 °C, according to requirements specification);
- $K_2 = 0.318$;
- $K_3 = 1.01$;
- $K_4 = 1$;
- $K_5 = 1$;
- $K_6 = 0.5$ (1st operational group);
- $K_6 = 1$ (2d operational group);
- $K_6 = 7$ (3d operational group);
- $K_6 = 10$ (4th operational group);
- $K_6 = 12$ (5th operational group);
- $K_6 = 15$ (6th operational group);
- $K_6 = 20$ (7th operational group);
- $K_6 = 40$ (8th operational group);
- $K_6 = 50$ (9th operational group).

Calculation of the mean life between failures of SE MMG

Within the framework of the given calculation all the known operation coefficients (K_6) characterizing the operating conditions of the device [6–8] were considered:

- Work in a geostationary orbit (without account of the start, the easiest, first group of operation characterized by value of 0.5);
- Two kinds of the cargo ground transportation;
- Three kinds of the sea transportation;
- Three kinds of aviation technologies (the third group is the most rigid, the ninth in the list, it is characterized by the value of 50 and corresponds also to the operating mode of the device in the starting conditions of the space vehicles).

Thus, the calculated values of the mean life between failures of SE MMG for each of the listed operational groups of equipment can be presented in the form of table 1.

Calculation of the full specified lifetime of SE MMG

Further, according to the requirements specification, the design of SE MMG should have the full specified lifetime equal to five years (43 800 hours).

In order to prove the specified parameter it is necessary to calculate the probability of no-failure operation (PNFO) for each operational group of equipment:

$$P = e^{-\left(\frac{43800}{\tau}\right)}.$$

The results of the calculation are presented in Table 2.

According to the generally accepted practice, during calculation of the reliability parameters the criterion of validity in relation to PNFO is defined on the basis of the following considerations: in case the operation life and the error-free running time are equal, the minimal admissible value of PNFO is accepted as equal to 63 % (which corresponds to the confidence interval of $\pm 1 \sigma$). At the same time, it is obvious, that the maximal value equals to 100 % (or is close to it). For the new products, the production technology of which cannot be considered as a batch one, the admissible value of PNFO is accepted as 80 %.

Conclusion

Within the framework of the current experimental work a calculation of reliability of SE MMG was done. The necessary calculation methods for obtaining of the numerical values were selected and substantiated. As a result, the values of the mean time between failures and the full specified lifetime were calculated and presented in the form of tables.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation according to contract № 02.G25.31.0200 of April, 27th, 2016, within the framework of the project 2015-218-07-052 "Research and Development of a MEMS Gyroscope for the Navigation Systems of a New Generation".

References

1. Xingguo X. *Built-in Self-test and Self-repair for Capacitive MEMS Devices*, Universitet Cincinnati, China, 2005, pp. 83–126.
2. Stark B. *MEMS Reliability Guidelines for Space Application*, NASA, California, 1999, 285 p.
3. Zhao Y. Stiction and Anti-Stiction in MEMS and NEMS. *Acta Mechanical*, 2003, no. 1, pp. 1–10.
4. Timoshenkov S. P., Simonov B. M., Goroshko V. N. *Osnovy teorii nadzozhnosti: uchebnik i praktikum dlja akademicheskogo bakalavriata*, Moscow, Jurajt, 2015, pp. 192–195 (in Russian).
5. *Avtomatizirovannaja sistema rascheta nadezhnosti JeRI zarubezhnogo proizvodstva* (ASRN-2004, OAO "RNII Jelektron Standart"), 2004 (in Russian).
6. Timoshenkov S. P., Zavodjan A. V., Simonov B. M., Goroshko V. N. *Ocenka i obespechenie nadzozhnosti izdelij mikro- i nanojelektroniki, mikrosistemnoj tekhniki*. Moscow, Jurajt, 2012, 288 p. (in Russian).
7. **MIL-HDBK-217F**. Military Handbook. Reliability Prediction of electronic Equipment, available at: <http://www.sre.org/pubs/Mil-Hdbk-217F.pdf>, 1991.
8. Semenov A. N., Shalimov A. S., Zuev E. V. *Issledovanie vozmozhnosti sozdaniya na BMK 5503 mikroschemy emkostnogo preobrazovatelja linejnogo uskorenija*, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2014, no. 11, pp. 49–51 (in Russian).

В. В. Амеличев, канд. техн. наук, нач. отд., e-mail: avv@tcen.ru,
 Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Научно-производственный комплекс
 "Технологический центр", г. Зеленоград,
А. А. Резнев, д-р техн. наук, зам. руководителя, e-mail: village@dol.ru,
 Федеральное государственное казенное учреждение "Войсковая часть 68240", г. Москва

МИКРОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТОКА

Поступила в редакцию 28.11.2017

Представлены основные конструктивные решения, используемые для создания магниточувствительных микросистем, на основе тонкопленочных анизотропных магниторезистивных наноструктур и концентраторов магнитного поля. Показаны формы передаточной характеристики и выходного сигнала, представлены достигнутые значения крутизны преобразования магниторезистивных микросистем магнитного поля и тока. Предложены варианты применения анизотропных магниторезистивных преобразователей в составе приборов и устройств контроля слабого магнитного поля, угла поворота и силы электрического тока в проводнике.

Ключевые слова: анизотропный преобразователь, конструктивно-технологический базис, концентратор, магнитное поле, магниторезистивная микросистема, тонкопленочная наноструктура, угол поворота, электрический ток

Введение

Современные темпы развития электронной компонентной базы требуют быстрой реакции на потребность рынка в новых функциональных приборах, способных регистрировать информацию непосредственно из окружающего мира [1]. Поэтому важным аспектом современного производства электронных компонентов является умение быстро и рационально пользоваться имеющимся конструктивно-технологическим базисом для решения новых задач. Созданный в НПК "Технологический центр" конструктивно-технологический базис тонкопленочных анизотропных магниторезистивных микросистем активно используется для создания новых функциональных приборов (датчики и преобразователи слабого магнитного поля, электрического тока, угла поворота и др.) [2–5].

Отличительными особенностями анизотропных магниторезистивных преобразователей (AMРП) на основе тонкопленочных наноструктур являются нечетная передаточная характеристика, относительно низкий уровень гистерезиса и достаточно высокая чувствительность [6]. Кроме того, для повышения крутизны преобразования в ряде разработанных AMРП используют концентраторы магнитного поля (КМП) [7].

Конструктивно-технологический базис анизотропных магниторезистивных микросистем

Разработанный конструктивно-технологический базис анизотропных магниторезистивных микросистем содержит блок технологических опера-

ций, позволяющих имплантировать миниатюрные КМП в кристалл, на поверхности которого в локальной области сформированы элементы на основе тонкопленочной магниторезистивной наноструктуры (ТМРНС). На рис. 1 показан эскиз поперечного сечения типовой конструкции кристалла AMРП с КМП.

Данное конструктивно-технологическое решение позволило создать серию одноосевых AMРП с необходимым набором следующих функциональных элементов:

- мостовой магниторезистивный преобразователь на основе ТМРНС с нечетной передаточной характеристикой;
- планарная катушка подмагничивания первого типа для корректировки начального смещения;
- планарная катушка подмагничивания второго типа для пропускания одноамперных импульсов тока, восстанавливающих направленность доменной структуры магниторезистивной пленки вдоль оси легкой намагниченности (ОЛН).

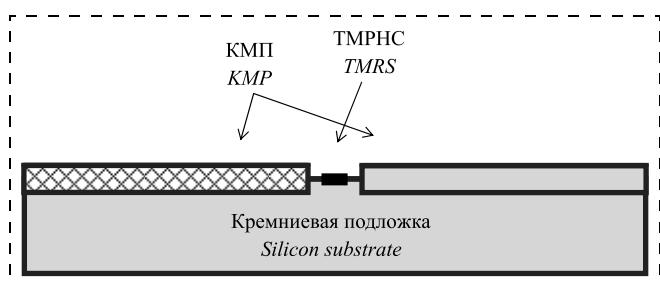


Рис. 1. Эскиз поперечного сечения AMРП с КМП
 Fig. 1. Sketch of the cross section of the AMRP with the KMP

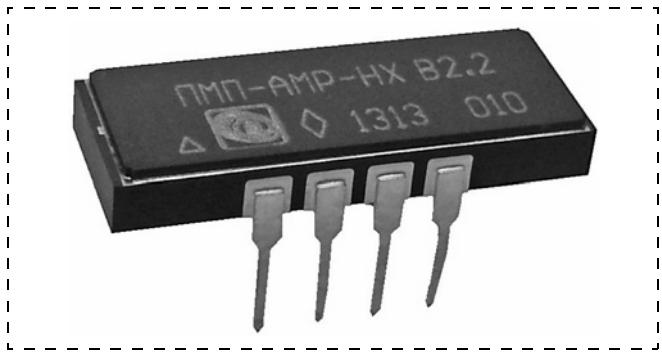


Рис. 2. Фотоснимок АМРП с нечетной передаточной характеристикой

Fig. 2. Photograph of the AMRP with an odd transmission characteristic

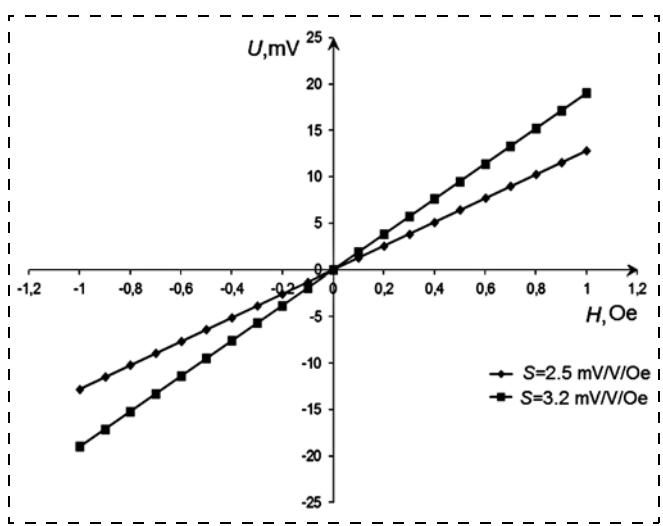


Рис. 3. Передаточные характеристики двух вариантов АМРП

Fig. 3. The transfer characteristics of the two AMRP variants

На рис. 2 представлен фотоснимок АМРП с нечетной передаточной характеристикой в металлокерамическом, немагнитном, герметичном корпусе. Ось магниточувствительности данного АМРП направлена вдоль длинной стороны. Потребителю предоставлена возможность выбора из двух вариантов данного преобразователя магнитного поля (ПМП). Первый вариант имеет сопротивление мостовой схемы на уровне 0,6...1,5 кОм и крутизну преобразования (чувствительность) не менее 3,2 мВ/(В · Э). Второй вариант имеет сопротивление мостовой схемы на уровне 1,5...2,5 кОм и крутизну преобразования не менее 2,5 мВ/(В · Э). На рис. 3 представлены передаточные характеристики двух разработанных вариантов АМРП в металлокерамическом восьмивыводном корпусе.

Применение АМРП и магниторезистивных микросистем в составе датчиков угла и тока

На основе представленной конструкции АМРП, имеющей высокую чувствительность и избира-

тельность по направлению, может быть реализован датчик угла поворота (ДУП). В основе конструкции ДУП — система четырех синхронно вращающихся валов, оканчивающихся постоянными магнитами, и четыре АМРП, расположенные над ними. На рис. 4 (см. третью сторону обложки) представлены фотоснимок фрагмента макета ДУП и формы его выходного сигнала (в аналоговом виде), поступающего от четырех АМРП, расположенных попарно на двух ортогональных направлениях. Это конструктивное решение повышает надежность и точность преобразования ДУП в условиях всех внешних воздействующих факторов и не зависит от положения в магнитном поле Земли.

Разработанный конструктивно-технологический базис АМРП также содержит блок технологических операций, позволяющих не только имплантировать миниатюрные КМП в кристалл, но и формировать сквозные отверстия в кристалле. Сквозное отверстие в кристалле предназначено для проводника с током, в котором необходимо контролировать его значения. Кольцевой КМП, имплантированный в кристалл в непосредственной близости от сквозного отверстия, усиливает наведенное вокруг проводника с током магнитное поле в зазоре более чем в 20 раз, что приводит к повышенному уровню выходного сигнала АМРП.

На рис. 5 (см. третью сторону обложки) представлен фотоснимок кристалла АМРП тока и внешний вид корпуса, в который он вмонтирован. Габаритные размеры керамического корпуса, с учетом длины выводов разъема, составляют 15 × 15 × 10 мм.

Передаточная характеристика АМРП тока нечетная, в диапазоне ±1 А имеет нелинейность не более 5 % (рис. 6). Крутизна преобразования дан-

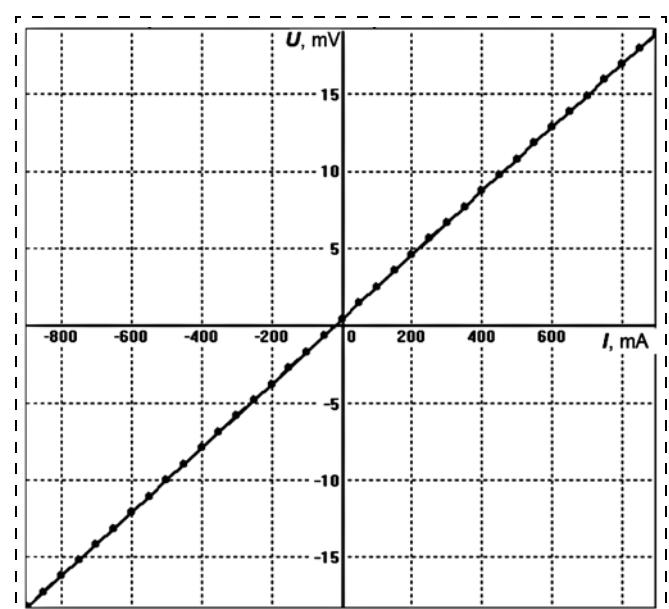


Рис. 6. Передаточная характеристика АМРП тока

Fig. 6. Transfer characteristics of the AMRP current

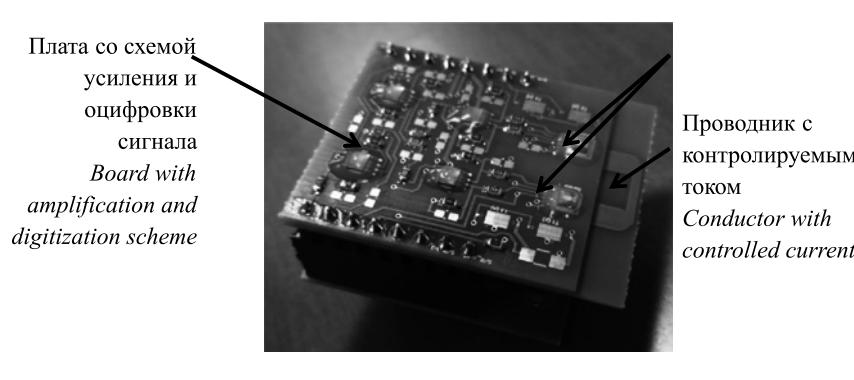


Рис. 7. Фотоснимок макета датчика тока с цифровым типом выходного сигнала, реализованный на основе двух АМРП

Fig. 7. Photograph of the breadboard prototype current sensor layout with a digital output signal type, implemented on the basis of two AMRP

ногого АМРП тока составляет 24 мВ/А, при этом порог чувствительности соответствует 1 мА.

Современные телеметрические системы в перспективе могут быть укомплектованы высокочувствительными датчиками тока с цифровым видом выходного сигнала. Для обеспечения необходимой точности преобразования в условиях широкого спектра дестабилизирующих факторов необходимо использование двух АМРП с параллельной схемой включения, которая позволяет в совокупности с П-образной формой проводника и другими микроэлектронными компонентами нивелировать влияние магнитного поля Земли и температурные дрейфы начального смещения мостовой схемы. На рис. 7 представлен фотоснимок макета датчика тока на основе двух АМРП, схем усиления, оцифровки сигнала и SPI интерфейса. Расчетные номинальные измеряемые токи данного датчика находятся в диапазоне 0,3...10 А.

Заключение

Разработанный конструктивно-технологический базис АМРП находит широкое применение в конструировании современных магнитополупроводниковых микросистем, в датчиках и преобразователях магнитного поля и тока. В результате выполнения опытно-конструкторской работы коллективом НПК "Технологический центр" были получены опытные образцы преобразователя слабого магнитного поля на АМР-эффекте с чувствительность 5,3 мВ/(В · Э). На основе таких преобразователей могут быть разработаны новые интроскопические и навигационные приборы, датчики угла поворота и перемещения.

В частности, с использованием разработанного конструктивно-технологического базиса АМРП в совокупности с технологическими процессами глубокого профилирования кремния получены мини-

атюрные преобразователи тока с пороговой чувствительностью 5 мА при номинальном токе 5 А. На основе двух АМРП с параллельной схемой включения может быть реализован датчик тока с цифровым выходом на номинальные токи в диапазоне 0,3...10 А и точностью преобразования не хуже 5 % в температурном диапазоне от -60 до +125 °C. Разработанные конструктивные решения могут быть использованы для контроля тока в неразрывном проводнике, а также и монтироваться в разрыв проводника, с полной гальванической развязкой. Областями применения датчиков тока с аналоговым и цифровым выходами являются машиностроение, транспорт, системы мониторинга различных потребителей электроэнергии и телеметрии.

Результаты, представленные в настоящей работе, получены при использовании оборудования ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" на базе НПК "Технологический центр".

Список литературы

1. Вернер В. Д., Мальцев П. П., Сауров А. Н. МЭМС и третья индустриальная революция // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 11. С. 2—5.
2. Амеличев В. В., Гамарц И. А., Лопатин В. В. и др. Преобразователи магнитного поля с четной характеристикой на основе тонкопленочных магниторезистивных структур // Электроника и информатика — 2005. V Международная научно-техническая конференция: Материалы конференции. Часть 1. М.: МИЭТ. 2005. С. 52—53.
3. Амеличев В. В., Галушкин А. И., Дягилев В. В. и др. Микроэлектронная магниторезистивная технология // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 22—26.
4. Благов Е. В., Амеличев В. В., Костюк Д. В. Магниторезистивный преобразователь для датчиков тока // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 4. С. 22—25.
5. Амеличев В. В., Аравин В. В., Белов А. Н., Красюков А. Ю., Резнев А. А., Сауров А. Н. Создание интегральных компонентов усиления магнитного сигнала в беспроводной МЭМС на основе магниторезистивных элементов // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 3. С. 29—33.
6. Борисов А. Современные АМР датчики для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей // Компоненты и технологии. 2006. № 7. С. 25—45.
7. Амеличев В. В., Благов Е. В., Костюк Д. В. и др. Магниторезистивная микросистема контроля электрического тока в проводнике // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 1. С. 40—42.

V. V. Amelichev, Ph. D., Head of Department, avv@tcen.ru,
Federal state budgetary scientific institution "Scientific-manufacturing complex "Technological centre",
Zelenograd, 124498, Russian Federation,
A. A. Reznev, D. Sc., Deputy Head, village@dol.ru,
Federal state institution "Military unit 68240", Moscow, 101000, Russian Federation

Corresponding author:

Amelichev Vladimir V., Ph. D., Head of Department, Federal state budgetary scientific institution "Scientific-manufacturing complex "Technological Centre", Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation, E-mail: avv@tcen.ru

Microsystems Based on Thin-film Anisotropic Magnetoresistive Converters of Magnetic Field and Current

Received on December 13, 2017

Accepted on February 12, 2018

Here are presented main design decisions that are used to create the magnetosensitive microsystems based on thin film anisotropic magnetoresistive nanostructures and magnetic field concentrators. Also are shown the forms of the transfer characteristics and the output signal, represented by the values of the slope conversion of magnetoresistive microsystems of magnetic field and current. The developed transducers of weak magnetic fields on the AMR effect with implanted in the crystal by the magnetic field concentrators have a sensitivity of 5.3 mV/(V·Oe). Particularly developed a constructive-technological basis that allows producing miniature current transformers with full galvanic isolation and a threshold sensitivity of 5 mA, at rated current 5A. Applications of anisotropic magnetoresistive transducers consisting of instruments and control device weak magnetic field, the rotation angle and the strength of an electric current in the conductor are proposed.

Keywords: anisotropic converter, constructive-technological basis, concentrator, magnetic field, magnetoresistive microsystem, thin-film nanostructure, the angle of rotation, electric current

For citation:

Amelichev V. V., Reznev A. A. Microsystems Based on Thin-Film Anisotropic Magnetoresistive Converters of Magnetic Field and Current, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 303–307.

DOI: 10.17587/nmst.20.303-307

Introduction

The modern development of the electronic component base requires a quick response to the market demands for new functional devices for recording information from all around [1]. Therefore, an important aspect of the production of electronic components is the ability to use the available constructive and technological basis quickly and efficiently for solving new problems. The constructive technological base of thin-film anisotropic magnetoresistive microsystems, created in SMC "Technological Centre", is actively used to create new functional devices (sensors and converters of a weak magnetic field, electric current, rotation angle, etc.) [2–5].

Distinctive features of the anisotropic magnetoresistive converters (AMRC) based on thin-film nanostructures are an uneven transfer characteristic, a rather low level of hysteresis and a sufficiently high sensitivity [6]. Also the magnetic field concentrators (MFC) are used in developed AMRCs to increase the conversion [7].

Constructive and technological base of anisotropic magnetoresistive microsystems

The developed constructive and technological base of anisotropic magnetoresistive microsystems contains a block of technological operations that allow implanting miniature MFCs into a crystal on the surface of which thin-film magnetoresistive nanostructure (TFMRN) elements are formed in

the local region. See Fig. 1 showing the cross-section of a typical design of an AMPP crystal with a cermet. A sketch is a cross-section of a typical AMRC crystal design with an MFC.

This solution allows creating a series of single-axis AMRC with the necessary set of functional elements of the following composition:

- Bridge magnetoresistive transducer based on TFMRN with an odd transfer characteristic;
- Planar magnetization coil of the first type, to adjust the value of the initial bias;
- Planar magnetization coil of the second type, for passing single-ampere current pulses, which restore the directionality of the domain structure of the magnetoresistive film along the axis of easy magnetization (AEM).

Fig. 2 shows a photograph of an AMRC with an odd transfer characteristic in a metal-ceramic, non-magnetic, hermetic package. The axis of magnetism of this AMRC is directed along the long side. The consumer has an opportunity to choose from two versions of this magnetic field converter (MFC). The first option has a bridge circuit resistance of 0.6...1.5 kΩ and a steepness of conversion (sensitivity) of at least 3.2 mV/(V·Oe). The second option has a bridge resistance of 1.5...2.5 kΩ and a conversion steepness at least 2.5 mV/(V·Oe).

Fig. 3 shows the transfer characteristics of the two variants of developed AMRC in a metal eight-pin ceramic case.

Application of AMRC and magnetoresistive microsystems as part of the angle and current sensors

A rotation angle sensor (RAS) can be realized on the base of AMRC's design, which has high sensitivity and selectivity in the direction. A system of four synchronously rotating shafts ending with permanent magnets and four AMRCs located above them lie at the root of the RAS design.

Fig. 4 (see the 3rd side of cover) shows a photograph of the fragment of the RAS layout and its output signal in analog form, coming from four AMRCs arranged in pairs in two orthogonal directions. This constructive solution increases the reliability and accuracy of the RAS conversion under all external factors and does not depend on the position in the Earth's magnetic field.

The developed constructive and technological base of AMRC also contains a block of technological operations that allow not only to implant miniature MFCs into the crystal, but also to form through holes in a crystal. The through hole in a crystal is intended for a conductor with a current in which it is necessary to monitor its values. The circular MFC implanted in the crystal in the immediate vicinity of a through hole, amplifies the magnetic field induced around the conductor with a current in the gap by more than 20 times, which leads to an increased level of the AMRC's output signal.

Fig. 5 (see the 3rd side of cover) shows a photograph of the AMRC current crystal and the appearance of the housing in which it is mounted. The dimensions of the ceramic case, taking into account the length of the connector's terminals, are $15 \times 15 \times 10$ mm.

The transfer characteristic of the AMRC current is odd, in the range ± 1 A has a nonlinearity of not more than 5 % (fig. 6). The steepness of the conversion of this AMRC current is 24 mV/A, while the sensitivity threshold corresponds to 1 mA.

Modern telemetry systems in the future can be equipped with highly sensitive current sensors with a digital output signal. To ensure the necessary accuracy of conversion in the conditions of a wide range of destabilizing factors, it is necessary to use two AMRCs with a parallel switching circuit, which allows jointly with the U-shaped form of the conductor and other microelectronic components neutralize the influence of the Earth's magnetic field and the temperature drifts of the initial displacement of the bridge circuit.

Fig. 7 shows a photo of the current sensor layout based on two AMRCs, amplification circuits, signal digitizing, and the SPI interface. The rated nominal currents of this sensor are in the range of 0.3...10 A.

Conclusion

The developed constructive and technological base of AMRC is widely used in the design of magneto-semiconductor microsystems, sensors and converters of the magnetic field and current. As a result of the experimental design work, the team of the SMC "Technological Center" obtained prototypes of a weak magnetic field converter on the AMR effect with a sensitivity of 5.3 mV/(V · Oe). Novel introspective and naviga-

tional instruments, angle and rotation sensors can be developed on the basis of such converters.

In particular, the miniature current converters with a threshold sensitivity of 5 mA at a rated current of 5 A were obtained with use of the developed constructive-technological basis of AMRC in conjunction with the technological processes of deep silicon profiling.

A current sensor with a digital output to rated currents in the range of 0.3...10 A and a conversion accuracy of no worse than 5 % in the temperature range from -60 to $+125$ °C can be realized on the basis of two AMRCs with a parallel switching.

These construction solutions can be used to control the current, both in an indissoluble conductor, and be mounted into a conductor rupture, with a full galvanic isolation. Applications of current sensors with analog and digital outputs are engineering, transportation, monitoring systems for various electricity consumers and telemetry.

The results presented in this paper were obtained using the equipment of the Common Use Center for Functional Control and Diagnostics of Micro- and Nano-System Engineering on the basis of the SMC "Technological Centre".

References

1. Verner V. D., Maltsev P. P., Saurov A. N. MEMS i tretya industrialnaya revolyutsiya, *Nano- i Mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 1, pp. 2–5 (in Russian).
2. Amelichev V. V., Gamarts I. A., Lopatin V. V., Popadinenets F. F., Reznev A. A. Preobrazovateli magnitnogo polya s chetnoj kharakteristikoj na osnove tonkoplenochnykh magnitoresistivnykh struktur, *Elektronika i informatika — 2005: V Mezdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya — V international scientific-technical conference. Materialy konferentsii*, Moscow, MIET, 2005, Part 1, pp. 52–53 (in Russian).
3. Amelichev V. V., Galushkov A. I., Dyagilev V. V., Kasatkina S. I., Muravev A. M., Lopatin V. V., Reznev A. A., Saurov A. N., Suhanov V. S. Mikroelektronnaya magnitoresistivnaya technologiya, *Nano- i Mikrosistemnaya tekhnika*, 2007, no. 3, pp. 22–26 (in Russian).
4. Blagov E. V., Amelichev V. V., Kostyuk D. V. Magnitoresistivniy preobrazovatel dlya datchikov toka, *Nano- i Mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 4, pp. 22–25 (in Russian).
5. Amelichev V. V., Aravin V. V., Belov A. N., Krasyukov A. Yu., Reznev A. A., Saurov A. N. Sozdanie integralnykh komponentov usileniya magnitnogo signala v besprovodnoj MEMS na osnove magnitoresistivnykh elementov, *Nano- i Mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 3, pp. 29–33 (in Russian).
6. Borisov A. Sovremennye AMR datchiki dlya detektsii skorosti, polozheniya i slabykh magnitnykh polej, *Komponenty i tekhnologii*, 2006, no. 7, pp. 25–45 (in Russian).
7. Amelichev V. V., Blagov E. V., Kostyuk D. V., Vasiliyev D. V., Belyakov P. A., Orlov E. P., Abanin I. E., Tachov V. S., Rukavishnikov A. I., Rossukany N. M. Magnitoresistivnaya mikrosistema kontroly elektricheskogo toka v provodnike, *Nano- i Mikrosistemnaya tekhnika*, 2014, no. 1, pp. 40–42 (in Russian).

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

MOLECULAR ELECTRONICS AND BIOELECTRONICS

УДК 621.382 + 612 + 159.922

DOI: 10.17587/nmst.20.308-320

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

СОЗНАНИЕ ЧЕЛОВЕКА, ИЛИ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНИКИ.

Часть I.

Поступила в редакцию 20.12.2017

На основе предложенной ранее полной электронной интерпретации функционирования мозга рассмотрен феномен "сознание человека". В первой части работы приведены принципы анализа феномена, проблемы и приближения его описания, а также суть созданной теории сознания человека.

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

"Полезно также знать людям, что не из иного места возникают у нас удовольствия, радости, смех и шутки, как именно отсюда (от мозга), откуда также происходят печаль, тоска, скорбь и плач. И этой именно частью мы мыслим и разумеем, видим, слышим и распознаем постыдное и честное, худое и добroe, а также все приятное и не- приятное, различая отчасти все это по установленвшемуся обычаю, а отчасти по той пользе, которую получаем. Этую же частью мы распознаем удовольствия и тягости, смотря по обстоятельствам, и не всегда нам бывает приятно одно и то же. От этой же самой части нашего тела мы и безумствуем, и сумасшествуем, и являются нам страхи и ужасы, одни ночью, другие днем, а также сновидения и заблуждения неуместные, заботы беспричинные; отсюда также происходит у нас незнание настоящих дел, неспособность и неопытность. И все это случается у нас от мозга..."

Гиппократ [1]

Введение

Известно, что человек — суперсложная динамическая самоорганизующаяся система. Строгое детальное исследование ее, в том числе и моделирование, на микроуровне, например клеточном, к сожалению, фактически невозможно. Ситуация усугубляется тем, что вследствие открытости системы необходимо в общем случае учитывать взаимодействия человека с окружающей средой (в том числе и обществом). В результате анализ должен осуществляться на самых разных уровнях описания с привлечением широкого спектра дисциплин (по крайней мере, их некоторых разделов), начиная с физики, химии, биологии, медицины и заканчивая философией. Ясно, что в общем случае это тем более невозможно.

Управляет человеком, как известно, нервная система, главным интегрирующим информационным центром которой является мозг. Только мозг человека — фантастический по сложности объект. Так,

число нервных клеток в нем около 10^{11} , число синапсов $10^{14} \dots 10^{15}$, а число ионных каналов и молекул около 10^{22} на 1 см^3 . Сложность проблемы рассмотрения функционирования мозга очень хорошо характеризует оценка общего количества информации по числу возможных нейронных состояний книги [2]: 2^{NK} , где N — число нейронов ($N = 10^{11}$), K — число поколений срабатывания ($K \gg 1$), т.е. имеем просто "астрономическое число". Таким образом, исследование даже только мозга является по-прежнему чудовищной сложности задачей.

Особенным результатом функционирования этой фантастической сложности информационной системы является сознание — главная загадка Природы. В связи с отмеченным ранее становится очевидной справедливость диалектического закона о переходе количества в качество.

Цель данной работы — рассмотрение сознания человека с точки зрения физики, в частности специалиста в области электроники. Важным при этом будет использование предложенных ранее ав-

тором полной электронной интерпретации функционирования мозга и комплексный иерархический подход его исследования, основанный на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами.

Принципы анализа

При рассмотрении сознания человека автор, прежде всего, руководствовался двумя принципами: 1) "центральной догмой" нейробиологии; 2) законом экономии или "бритвы Оккама".

Первый означает, что "все нормальные функции здорового мозга и все их патологические нарушения, какими бы сложными они ни были, можно в конечном счете объяснить исходя из свойств основных структурных компонентов мозга" [3]. Нетрудно заметить, что это современная, красавая и элегантная формулировка гениальной мысли, изложенной в эпиграфе и высказанной более двух тысяч лет назад. Отмечу, что подобные "рабочие гипотезы" использовали многие, в том числе выдающиеся, исследователи мозга. Следовательно, автор придерживается идеи интернализма, согласно которой "сознание и квалиа — это особенности мозговой активности, и поэтому они в буквальном смысле находятся в мозге" [4]. Многочисленные данные нейробиологии, нейропсихологии свидетельствует о том, что это именно так. Разрушаются некоторые важные области мозга человека, и сознание существенно меняется либо исчезает вообще (см., например, [4–6]).

Использование закона экономии или "бритвы Оккама" [7] означает, что при аргументации будут использованы только установленные факты физики, нейробиологии, медицины и ряда других научных дисциплин. Таким образом, попытаемся обойтись этим "минимумом", т.е. без привлечения потусторонних сил, мифических полей и необоснованных гипотез, а проще говоря, фантазий.

Кроме того, важными в дальнейшем рассмотрении будут предложенные ранее автором полная электронная интерпретация функционирования мозга и комплексный иерархический подход его исследования, основанный на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами, подробно изложенные в работах [8–13] и дополненные в статье [14] и обзоре [15]. Замечу, что многие идеи этих работ для мозга в целом будут использованы и здесь, но уже применительно к сознанию человека.

Проблемы и приближения

Проблемы начинаются с определения понятия "сознание". Автор встречал в литературе их очень много. К сожалению, практически все они имеют

те или иные недостатки (излишняя общность, витиеватость, сложность и т. п.), что, по-видимому, является следствием особой многогранности рассматриваемого явления Природы и, скорее всего, в данном случае — это неизбежно. Одним из наиболее удачных и в то же время компактных, следует считать определение, приведенное в добротном монографическом учебнике профессора А. Ревонсую, а именно [4]: "Внутренний поток субъективных переживаний, непосредственно присутствующий в нас и постоянно обнаруживающий себя нам, и есть сознание".

При рассмотрении феномена "сознание", строго говоря, необходимо анализировать следующую полную систему [15]: мозг — другие составляющие нервной системы — тело — окружающая среда. Это связано с тем, что мозг, так же как и человек в целом (см. Введение), является открытой, динамической и самоорганизующейся в данном случае подсистемой. И хотя сознание в соответствии с принятой идеей интернализма является продуктом мозга, на сознание бесспорно оказывают влияние и другие составляющие полной системы, причем это влияние не одностороннее и может быть существенным. Более того, при анализе сознания конкретного человека в конкретный момент времени необходимо задать исходные данные об этой системе или, по крайней мере, полную информацию о мозге в соответствующий момент времени. Экспериментально это вряд ли возможно. В то же время промоделировать *всю* предысторию развития мозга до соответствующего момента времени — задача фантастической сложности и вряд ли тоже когда-нибудь будет решена [8]. Поэтому закономерный и естественный путь — переход к приближенному описанию таких суперсложных объектов, как мозг человека и, в частности, сознание. Сразу же отмечу, что приближений в описании сознания может быть много. И это нормально! Так как речь идет о задачах, которые в математике называются труднорешаемыми класса *NP* [8], т. е. о задачах особой степени сложности.

В соответствии с принятой "центральной догмой" нейробиологии будем, прежде всего, связывать сознание с комплексом физико-химических процессов, происходящих в живом мозге человека и поддерживающих этот вид деятельности. В свете изложенного выше уже это утверждение является приближением. Возможно ли описание хотя бы этого вида деятельности? Ответ предельно прост: "Вряд ли." И тут есть, по крайней мере, две фундаментальные причины или проблемы: 1) по-видимому, невозможно отделить сознательную деятельность мозга от других многочисленных его функций, прежде всего психических, происходящих в то же время параллельно и, скорее всего, с

пересечениями, т. е. имеет место взаимовлияние (проблема "развязки", см. далее гибкость связей); 2) модели (идеализации) не могут полностью соответствовать объектам, а тем более таким сложным как мозг человека, сознание.

Говоря о первой проблеме, по-видимому, ее хотя бы приближенное решение возможно только с привлечением моделирования. Вторая проблема отражает чисто философскую точку зрения. В работе [16] автор назвал ее "проблемой "первого шага"" или начала идеализации, и она, к сожалению, неустранима в науке, использующей модели. Следовательно, любое математическое моделирование функционирования мозга будет приближенным. В то же время отсутствие ясного и четкого определения понятия "сознание" осложняет ситуацию.

Таким образом, следует согласиться с тем, что *точное описание сознания человека невозможно в принципе, и мы вынуждены перейти к его приближенному описанию*.

Именно невозможность точного описания сознания и будет являться "фундаментальной основой бесконечных спекуляций" в стиле: "В сознании человека мы чего-то не понимаем. Здесь есть что-то таинственное". Чтобы остыть пыл или радость скептиков, догматиков, шарлатанов и пр., приведу всего лишь два аргумента (более подробно см. [8]). Во-первых, мозг лишь приближенно отражает, а точнее реконструирует, то, что происходит в Природе в действительности. Поэтому надо ли его описывать точно? Ответ очевиден: "Нет!" Во-вторых, даже в таком гораздо более простом устройстве электроники, как телевизор, мы не знаем поведение того или иного электрона в процессе функционирования прибора и никогда не узнаем в соответствии с положениями квантовой механики, в частности с принципом неопределенности Гейзенберга. Тем не менее мы понимаем, как работает телевизор, можем его изготавливать и ремонтировать. В связи с этим при изучении феномена "сознание" главная и реальная цель, которая должна, как мне кажется, ставиться, — лечение самых различных психических заболеваний; в данном случае — расстройств сознания. Думаю, что для этой цели приближенного описания сознания человека будет вполне достаточно, т. е. она реально достижима. Во всяком случае, об этом свидетельствуют успехи в медицине мозга человека.

В свете изложенного выше все существующие на настоящее время теории сознания (хороший обзор современных сведений о сознании и систематизация соответствующих теорий даны в книге [4]) должны рассматриваться как приближенные, причем зачастую достаточно грубые или просто неправильные. Поэтому современные попытки реализа-

ции точных копий сознания человека в целях их переноса на ЭВМ (своебразный вариант бессмертия) следует воспринимать как сильное преувеличение реальных возможностей.

Итак, какое же понимание психических функций человека, включая сознание, будет наиболее адекватным? По мнению автора, это следующая формулировка: "Психические функции, включая сознание, обусловлены энергетическими потоками в мозге человека, обеспечивающими соответствующий вид деятельности". К сожалению, такое понимание не может быть строго описано хотя бы по одной из указанных ранее фундаментальных причин. Приближения являются по-прежнему вынужденными.

Наиболее перспективной для дальнейшего развития будем считать точку зрения, ставшей канонической в нейронауках. Так, согласно данным нейрофизиологии, обработка информации в мозге, а также различные психические функции связываются с работой нейронных ансамблей (в дальнейшем — цепей). В частности, применительно к рассматриваемому вопросу перспективно использование концепции исследования нейрональных коррелятов сознания (НКС), заключающейся в определении "каковы минимальный достаточный объем нейронов или активность нервной системы, которая обязательно сопровождает то или иное осознаваемое переживание" [4].

Замечу, что в этом случае главное значение придается нервным клеткам — нейронам. Другому типу клеток мозга — нейроглии — отводятся лишь вспомогательные функции. Хотя это предположение и вызывает сильное возражение у некоторых специалистов (см., например, [17]), проведенные в ряде специальных дисциплин о мозге обширные исследования свидетельствуют о его допустимости (см., например, [18—20]). И тем не менее понятно, что концепция НКС — это приближение к тому, что в действительности происходит и является результатом уже нескольких шагов предположений.

Несмотря на достигнутые бесспорные успехи в нейронауках (нейрофизиологии, нейропсихологии и др.), к сожалению, на настоящий момент времени не создана общепризнанная и не вызывающая сомнений теория сознания (см., например, [4]), что может быть связано с отмеченными ранее объективными и очень серьезными сложностями. Выделю, однако, наиболее ценные для дальнейшего рассмотрения принципы и положения этих наук.

1. Принципы высшей нервной деятельности [21]: рефлекса, доминанты, отражения и системной деятельности мозга.

2. "Даже самая простая психическая функция есть результат интегративной деятельности целостного мозга" [21].

3. "...структурную основу церебральных функций составляют распределенные системы. Каждую функцию обуславливает определенное сочетание корковых и подкорковых центров" [18].

Таким образом, мозг в целом является локально-распределенной системой. Поэтому значительные усилия были предприняты по выделению в мозге подсистем, ответственных за те или иные функции. С точки зрения автора наиболее удачными являются два разбиения [5, 22].

Так, важной является разработанная выдающимся советским нейропсихологом профессором А. Р. Лурией теория системной динамической локализации высших психических функций (к ним традиционно относят память, восприятие, мышление, речь). Согласно структурно-функциональной модели мозга как субстрата психической деятельности он разделяется на три основных блока (подсистемы), а именно [5]: 1) блок регуляции уровня активности мозга; 2) блок приема, переработки и хранения информации, поступающей из внешнего мира; 3) блок программирования, регуляции и контроля психической деятельности. Наиболее важной составляющей третьего блока является префронтальная кора. А. Р. Лурия также отмечал, что любая высшая психическая функция осуществляется при участии всех выделенных блоков (подсистем).

Другое и более современное разбиение предложил известный американский нейрофизиолог и нейропсихiatр, один из пионеров использования компьютерной томографии в психиатрии доктор Д. Амен. Он разбил мозг на пять подсистем*, а именно [22]: 1) глубокая лимбическая подсистема; 2) базальные ганглии; 3) префронтальная кора; 4) поясная подсистема; 5) височные доли головного мозга. Д. Амен также подчеркивает, что подсистемы не существуют изолированно. "Они соединены между собой миллионами сложных связей. Всякий раз, когда поражается одна система*, скорее всего, в процесс окажутся вовлечены и другие" [22]. Применяемый Д. Аменом метод визуализации мозга позволил не только выделить его подсистемы, но и, что самое важное, разработать на этой основе достаточно эффективные терапевтические методы лечения многих психических расстройств конкретных пациентов. По моему мнению, данный подход перспективен в психиатрии, особенно по мере улучшения качеств инструментов визуализации мозга человека. В целом, несмот-

ря на всю условность разбиения мозга на подсистемы, оно будет также полезно, по крайней мере, на начальных этапах моделирования различных функций мозга. Не моделировать же сразу весь мозг при рассмотрении отдельных психических функций? Вряд ли, однако, это получится (см. далее).

Полная электронная интерпретация функционирования мозга

Как уже отмечалось, сознательная деятельность определяется всем комплексом физико-химических процессов, протекающих в мозге человека при ее обеспечении. К сожалению, это очень "запутанный клубок" процессов. Строго говоря, на них влияют все силы Природы. Так как мы связываем психические функции с функционированием нейронных цепей, то при этом влияние на их работу могут оказывать следующие взаимосвязанные процессы: электрические, химические, механические, тепловые и др. Замечу, что традиционно в нейробиологии выделяют химические и электрические процессы [18, 19] (поэтому нередко мозг называют "электрохимическим устройством"), причем предпочтение, как правило, отдается химическим. Из указанного ранее ясно, что они могут быть в действительности только обычно доминирующими процессами. Даже при таком упрощении по-прежнему трудно "развязать" остающийся "клубок".

Для того чтобы попытаться это сделать, и предложена полная электронная интерпретация функционирования мозга человека [8—15].

В качестве основы была принята гипотеза 1: считается, что доминирующее влияние на функционирование мозга оказывают электрические процессы. Таким образом, полагается, что обработка информации в мозге идет в основном на уровне электрических процессов. Химические процессы обеспечивают прежде всего питание нейронных (электрических) цепей мозга, а также их модификацию.

Было показано, что *вся* нейронная цепь мозга может интерпретироваться в качестве нелинейной электрической цепи (первый тип), обладающей следующими основными свойствами: 1) нейронная цепь — это сначала растущая, а затем модифицируемая электрическая цепь (главное отличие от интегральных схем (ИС) твердотельной электроники — электрических цепей второго типа); 2) нелинейная электрическая цепь первого типа характеризуется не только крайне сложной топологией, но и вариацией свойств составляющих ее, казалось бы, однотипных элементов (тела клеток, аксоны, дендриты, шипики, синапсы и др.); 3) электрические цепи первого типа могут демонстрировать большое разнообразие в поведении в зависимости

* У Д. Амена используется термин "система". Для нас более точным будет термин "подсистема".

как от входящих, так и от проходящих по ним сигналов; 4) с точки зрения электроники мозг зрелого человека — это, прежде всего, набор нелинейных электрических (нейронных) цепей двух видов, которые не должны модифицироваться и которые могут модифицироваться.

Ключевыми (активными) элементами в электрических (нейронных) цепях мозга являются ионные каналы. В связи с этим сделаю несколько выдержек из блестящего учебника по нейробиологии, а именно [19]: "Для успешного функционирования нервной системы нейроны должны обладать весьма разнообразным репертуаром электрической активности... Все эти варианты зависят, в конечном счете, от активации или деактивации ионных каналов, регулирующих ионные токи через мембранны нервных клеток". Определенный вклад в перенос ионов вносят и другие каналы (переносчики) — ионные насосы (помпы), обменники [19]. И тем не менее "следует рассматривать ионные каналы как системы, проводящие электрические сигналы, а переносчики — как системы обеспечения базовых условий, при которых такое проведение становится возможным" [19]. Замечу, что в настоящее время уже установлено большое число разнообразных типов, видов и подвидов каналов [19, 23].

Ионные каналы — сложные наноэлектромеханические системы (НЭМС) [8]. Это связано со следующими основными причинами: 1) характерные размеры всех структур, формирующих ионные каналы, лежат в нанометровом диапазоне [19, 23]; 2) конформационные переходы белков и/или их субъединиц (доменов), приводящие к пропусканию ионов, — это инициированные электрическими сигналами процессы, в которых важны механические силы [23]. Физика этих переходов достаточно сложна (см., например, [23]), однако самое интересное заключается в том, что эти НЭМС могут контролировать прохождение отдельных ионов (основными являются ионы калия, натрия, кальция и хлора) с характерными размерами уже в единицы ангстрем, т. е. менее 1 нм. Сложными НЭМС являются и другие каналы, в частности ионные насосы.

Следовательно, в соответствии с предложенной интерпретацией активными элементами являются различные каналы, т. е. НЭМС, проводящие ионы и определяющие электронику мозга, а мозг в целом можно рассматривать как объект органической гибридной наноэлектроники [8, 16]. В связи с этим отмечу принципиальное отличие от ИС твердотельной микро- и наноэлектроники, в которых активными элементами являются диоды и транзисторы. Таким образом, Природа пошла по качественно иному пути. В то же время сами нейроны, формирующие нейронные цепи, являются уже гораздо

более сложными интегрирующими устройствами, и, образно говоря, их аналоги — целые ИС. Поэтому интерпретация нейронов как основных активных элементов (часто нейрон в нейронауках сравнивают с транзистором) мозга — весьма сильное упрощение с точки зрения электроники. Все намного сложнее.

Интересно оценить, хотя бы грубо, уровень интеграции мозга человека как объекта электроники. Оценку делаем, как это принято в микро- и наноэлектронике, по числу активных элементов. Так как число нейронов в мозге около 10^{11} , то число каналов, проводящих ионы, т.е. активных элементов, будет ориентировочно на 8—10 порядков выше*, т.е. речь идет о цифрах в диапазоне $10^9 \dots 10^{21}$. Сейчас мы можем скорректировать оценку работы [2] (см. Введение) общего количества информации по числу возможных состояний, но уже каналов (открыт—закрыт), а именно: 2^{MK} , где M — число каналов (возьмем нижний предел $M = 10^9$), K — число поколений срабатывания ($K \gg 1$), т.е. имеем еще намного более грандиозное число. Следовательно, мозг человека — фантастического уровня интеграции объект наноэлектроники. Неудивительно, что именно такая система — шедевр электроники, созданный Природой, — и порождает сознание (с указанными ранее оговорками). Нетрудно заметить, что строгое моделирование такой системы и в данном приближении невозможно [8].

Было рассмотрено, как приблизительно функционирует мозг человека в рамках предложенной полной электронной интерпретации. В частности, выделено три типа режимов работы мозга как набора нелинейных электрических цепей, а именно: 1) при внешнем воздействии; 2) без внешнего воздействия (внутренний); 3) смешанный. Все отдельные режимы работы, включая восприятие, воспоминание, мышление и другие психические функции, относятся к одному из указанных типов. В то же время любой специфический режим работы живого мозга, включая психические функции, является результатом прохождения электрического сигнала (сигналов) по соответствующему набору электрических (нейронных) цепей **, что и объединяет режимы, т.е. является общим для них всех. Основными операциями при этом являются сравнение, кодирование, декодирование, команда к действию, модификация нейронных цепей.

В частности, мысль — это декодирование (внутреннее воспроизведение) электрического сигнала

* К сожалению, автору не удалось найти в литературе необходимых сведений. Оценка сделана по числу ионных каналов в аксоне кальмара $\sim 10^{10}$ [24].

** Для психической функции этот набор цепей может быть назван нейронным коррелятом психической функции (НКПФ) по аналогии с НКС.

(сигналов), инициированного самим мозгом и проходящего по различным нейронным цепям мозга соответствующей пространственно-временной конфигурации [8, 11]. Следовательно, мысль — это своеобразный обратный процесс по отношению к обработке поступающей информации (прямой процесс), который инициируется, по-видимому, в основном корой головного мозга, т.е. по нейронным цепям проходят токи и в результате происходит декодирование информации, содержащейся в соответствующих нейронных цепях.

В современной психологии выделяют две системы мышления [25]: система 1 (автоматическая система) и система 2 (произвольная система). *Система 1* срабатывает автоматически и очень быстро, не требуя или почти не требуя усилий и не давая ощущения намеренного контроля. *Система 2* выделяет внимание, необходимое для сознательных умственных усилий, в том числе для сложных вычислений. Действия системы 2 часто связаны с субъективным ощущением деятельности, выбора и концентрации... Система 1 импульсивна и интуитивна, а система 2 способна к рассуждениям..." [25]. Можно считать, что автоматическая система функционирует на подсознательном уровне, а произвольная система — с участием осознания.

Удобно представить мыслительную деятельность в целом происходящей по "спирали" (один из возможных вариантов "потока сознания"*)). Так, один из витков спирали работы автоматической системы (системы 1) показан схематично на рис. 1. Сначала следует планирование (моделирование или прогноз) ситуации, а затем — действие. Процесс может продолжаться и далее. Работа произвольной системы (системы 2) более разнообразна и сложна. Несколько вариантов одного витка "спирали" представлены на рис. 2. В первом варианте (рис. 2, *a*) сначала следует планирование (моделирование или прогноз) ситуации, затем — действие (точнее, его управление мозгом), а после этого — осознание. Именно этот вариант вызвал наиболее бурную дискуссию в нейрофизиологической литературе (известные эксперименты Б. Либета 1980-х годов "о свободе воли" [2]). Сначала происходит действие, а затем — осознание. Однако замечу, что осознание в первую очередь необходимо для осуществления контролирующей и управляющей функций и может включаться в различные моменты времени "спирали" мыслительной деятельности, пытаясь сделать ее более эффективной и качественной. Возможен и более простой вариант работы системы 2 (рис. 2, *б*): планирование

* Термин введен выдающимся американским психологом и философом У. Джеймсом.

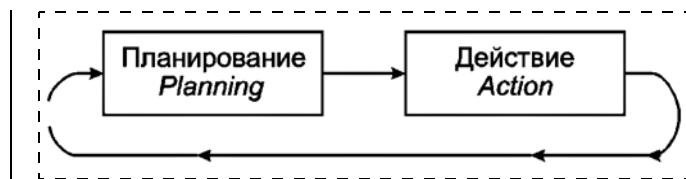


Рис. 1. Виток "спирали" автоматической системы
Fig. 1. The "spiral" turn of the automatic system

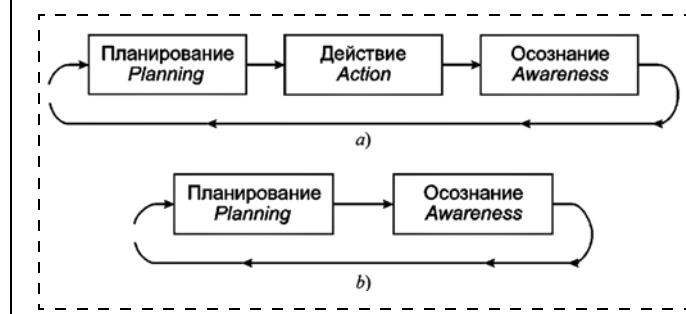


Рис. 2. Возможные варианты витка "спирали" произвольной системы: *a* — с участием "действия", *b* — без участия "действия"
Fig. 2. Possible versions of the "spiral" turn of the arbitrary system: *a* — with participation of "action", *b* — without participation of "action"

(моделирование или прогноз) ситуации, а затем — осознание.

Очевидно, что только из отмеченных вариантов витков могут быть сформированы очень сложные "спирали" мыслительной деятельности. Следует также заметить, что сами ситуации и действия могут разбиваться на составляющие (части), что еще больше усложняет рассмотрение процесса мышления.

Подчеркну, что сознание — бесспорно системное, интегративное свойство мозга человека, которое обеспечивается многими областями, однако анализ многочисленных (в основном экспериментальных) данных нейронаук (нейрофизиологии, нейропсихологии и др.) позволяет сделать вывод, что, по-видимому, областью, прежде всего отвечающей за осознание, является префронтальная кора головного мозга. Следовательно, инициация и возможное сопровождение мыслительной деятельности в случае работы системы 2 происходит в нейронных цепях этой области, а далее осуществляется гибкое связывание с нейронными цепями различных структур и областей мозга в зависимости от того, какая это мысль. Если в результате этой мысли происходит какое-то действие, то для его осознания необходимо, чтобы информация поступила для обработки в префронтальную кору. В результате и происходит естественная задержка, что объясняет эксперименты Б. Либета (см. Часть II), а также более медленное и затратное функционирование системы 2 по сравнению с экономич-

ной системой 1, характеризующейся массовым параллелизмом в работе.

Гибкость же связывания достигается, по крайней мере, на трех уровнях [14]: 1) связей между областями и/или структурами мозга; 2) нейронных ансамблей (в областях и структурах мозга могут участвовать в работе разнообразные нейронные ансамбли); 3) нейронов (полифункциональны и сами нейроны). А это означает, что при обеспечении разных психических функций могут участвовать одни и те же области (их подобласти), нейронные цепи (их элементы) и, судя по всему, даже отдельные нейроны. Это сильно усложняет анализ и приводит к проблеме "развязки" психических функций (см. ранее).

Согласно изложенному выше, резкое противопоставление сознательной и подсознательной деятельности мозга, с моей точки зрения, неверно. Основное различие состоит главным образом в том, что в случае работы системы 2 необходимо участие нейронных цепей мозга префронтальной коры, отвечающих за осознание.

Следовательно, осознанная мысль — это декодирование (внутреннее воспроизведение) электрического сигнала (сигналов), инициированного самим мозгом и проходящего по НКС мозга соответствующей пространственно-временной конфигурации, т.е. по нейронным цепям проходят токи и возникают образы, понятия и т.п. в результате декодирования информации, содержащейся в соответствующих нейронных цепях. Таким образом, *обычно мышление — внутреннее восприятие человеком закодированной в самом же мозге информации* [8, 11], а *"мыслительная деятельность, судя по всему, — суть макроскопические коллективные явления в нелинейных электрических цепях первого типа"* [8, 13], т.е. мысль в мозге человека — материальна! Материальны, как следует из предыдущего, и другие психические функции.

В соответствии с классификацией работы [4] предложенная теория в рамках полной электронной интерпретации функционирования мозга человека может быть отнесена к монистической материалистической теории сознания эмерджентного типа [14]. Отмечу, что в данной теории становится понятным, что такое мысль. Думаю, что приведенное определение мысли — весьма неплохое приближение к истине.

В то же время мнение нейробиологов по рассматриваемому в работе вопросу в целом неплохо выражает следующая цитата [26]: "Мы можем утверждать, что сознание и мозг коррелируют с точки зрения своих функций, однако мы в действительности не знаем, какими именно способами мозговая активность и функции сознания взаимоотворяют друг друга".

Список литературы

1. Гиппократ. Избранные книги. Книга "О священной болезни". М.: Гос. изд. биол. и мед. литературы, 1936. 736 с.
2. Kaku M. The future of the mind: the scientific quest to understand, enhance, and empower the mind. New York: Doubleday Publishers, 2014. 400 р.
3. Блум Ф., Лейзерсон А., Хофтедтер Л. Мозг, разум и поведение. М.: Мир, 1988. 248 с.
4. Revonsuo A. Consciousness. The science of subjectivity. Hove and New York: Psychology Press, Taylor & Francis Group. 2010. 324 р.
5. Лурия А. Р. Основы нейропсихологии. М.: Изд-во МГУ, 1973. 375 с.
6. Хомская Е. Д. Нейропсихология. М.: Изд-во Моск. университета, 1987. 288 с.
7. Новая философская энциклопедия: Т. 3. М.: Мысль, 2010. 692 с.
8. Абрамов И. И. Мозг как объект электроники. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 80 с.
9. Abramov I. I. Brain as an object of electronics. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 76 р.
10. Абрамов И. И. Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Ч. I // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 1. С. 52—54.
11. Абрамов И. И. Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Ч. II // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 3. С. 45—53.
12. Абрамов И. И. Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Ч. III // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 5. С. 45—54.
13. Абрамов И. И. Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Ч. IV // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 6. С. 49—53.
14. Абрамов И. И. Перспективы использования наноэлектроники, наноматериалов и нанотехнологий в исследовании и медицине мозга человека // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 1. С. 49—64.
15. Абрамов И. И. Мозг человека — шедевр естественной электроники. Проблемы и перспективы исследования // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. "Актуальные проблемы радио- и кинотехнологий", 2017, Россия, Санкт-Петербург. С. 79—86.
16. Абрамов И. И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. I. Основные положения // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 8. С. 34—37.
17. Куб Э. Источник мысли. М.: Эксмо, 2011. 208 с.
18. Шеперд Г. Нейробиология: в 2-х т. М.: Мир, 1987.
19. Николлс Дж. Г., Мартин А. Р., Валлас Б. Дж., Фукс П. А. От нейрона к мозгу. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 672 с.
20. Cognition, brain, and consciousness. Introduction to cognitive neuroscience. Second Edition / Ed. by B. J. Baars, N. M. Gage. Amsterdam: Elsevier, 2010. 658 р.
21. Батуев А. С. Физиология высшей нервной деятельности и сенсорных систем: учебник для вузов. СПб.: Питер, 2010. 317 с.
22. Амен Д. Измените свой мозг — изменится и жизнь! М.: Эксмо, 2014. 448 с.
23. Джаксон М. Б. Молекулярная и клеточная биофизика. М.: Мир, БИННОМ. Лаборатория знаний, 2009. 551 с.
24. Антонов В. Ф., Козлова Е. К., Черныш А. М. Физика и биофизика: учебник. М.: ГЭОТАР—Медиа, 2013. 472 с.
25. Канеман Д. Думай медленно... решай быстро. М.: Изд-во АСТ, 2016. 653 с.
26. Сигел Д. Внимательный мозг. Научный взгляд на медитацию. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2016. 336 с.

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

Corresponding author:

Abramov Igor I., Dr. Sci., Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

Human Consciousness, or Possibilities of Electronics.

Part I.

Received on December 20, 2017

Accepted on January 17, 2018

The phenomenon of "human consciousness" is considered on the basis of the full electronic interpretation of brain functioning proposed earlier. In the first part of the work the principles of the analysis of the phenomenon, problems and approximations of its description, as well as the essence of the developed theory of human consciousness are presented.

In particular, it has been shown that an accurate analysis of human consciousness is impossible in principle. In this regard, the transition to an approximate consideration of consciousness is actually forced. When considering the phenomenon of "consciousness", strictly speaking, it is necessary to analyze the following complete system: "the brain — other components of the nervous system — the body — the environment." This is related to the fact that the brain, as well as the person as a whole, is an open, dynamic and self-organizing subsystem in this case. Even though consciousness is a product of the brain in accordance with the concept of internalism adopted in the work, other components of the complete system are certainly influencing consciousness, and this influence is not one-sided and can be significant. Therefore a rigorous treatment of the brain functioning is hardly possible. Analysis of known promising approaches to the description of consciousness leads to the conclusion that the use of the full electronic interpretation of the functioning of the human brain proposed by the author is the most realistic way at the present stage of neuroscience development. A theory of human consciousness has been developed on the basis of this interpretation. It is described in detail in this part of the work. Thought and other mental functions are material in accordance with the theory. It is noted that the proposed theory can be attributed to the monistic materialistic theory of consciousness of the emergent type.

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

For citation:

Abramov I. I. Human Consciousness, or Possibilities of Electronics. Part I., *Nano- I Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 308—320.

DOI: 10.17587/nmst.20.308-320

"It is also useful to know for people that our joys, pleasures, laughter and jokes come not from any other place, but exactly from here (from the brain), from where our grief, melancholy, sorrow and lamentations also come.

And exactly with this part of the body we think and we understand, we see, we hear and we distinguish what is shameful and what is fair, what is evil and what is good, everything that is pleasant and unpleasant, distinguishing all this partly by the established custom, and partly by the advantage, which we get. By this part of the body we distinguish pleasure and burden, depending on the circumstances, and, at that, one and same thing is not always pleasant for us. From the same part of our body we also rave and go crazy, and we feel fears and the horrors, some of them at night, the other ones in the daytime, and also dreams and inappropriate errors, and causeless cares; from here also comes the ignorance of the present affairs, inability and inexperience. And all this comes to us from the brain... "

Hippocrates [1]

Introduction

A person is a supercomplex dynamic selforganizing system. Unfortunately, its rigorous research including modeling, at the microlevel, the cellular level for example, is actually impossible. The situation is aggravated by the fact that because of the openness of the system, it is necessary to take into account the interactions of a person with the environment (including society). As a result, an analysis should be carried out at most varied levels of the description with attraction of a wide spectrum of disciplines (at least, their cer-

tain sections), beginning from physics, chemistry, biology, medicine and ending with philosophy. Obviously, in a general case it is even more impossible.

As is known, a human organism is controlled by the nervous system, the main integrating information centre of which is brain. The human brain is fantastically complex object. Thus, the number of the nervous cells in it is about 10^{11} , the number of the synapses equals to $10^{14} \dots 10^{15}$, and the number of the ion channels and molecules is almost 10^{22} per 1 cm³. The complexity of the problem of the brain functioning is characterised well by the estimation of the total volume of the

information by the number of possible neural states of a book [2]: 2^{NK} , where N — number of neutrons ($N = 10^{11}$), K — number of generations of operation ($K \gg 1$), i.e., it is an "astronomical number". Thus, the research of a brain only is a problem of "monstrous complexity".

Especial result of functioning of this information system of fantastic complexity is the consciousness, the main riddle of Nature. There is an obvious justice in the dialectic law of transition of quantity into quality.

The aim of the given work is consideration of the human consciousness from the point of view of physics, from the point of view of an expert in electronics, in particular. An important role in this will be played by a fully electronic interpretation of the brain functioning and a complex hierarchical approach to its research based on a multilevel modelling in combination with the experimental methods, proposed by the author.

Principles of analysis

During consideration of the human consciousness the author was guided by two principles: 1) "the central dogma" of neurobiology; 2) the economy law or Occam's Razor.

The first one means, "that all normal functions of a healthy brain and all their pathological disorders, whatever complex they are, in the long run, could be explained proceeding from the properties of the basic structural components of the brain" [3]. It is easy to notice, that it is a modern, beautiful and elegant formulation of a brilliant thought, which was stated in an epigraph and expressed over two thousand years ago. I should point out, that similar "working hypotheses" were used by many, including outstanding, researchers of the brain. Hence, the author adheres to the idea of the internalism, according to which "consciousness and qualia are the features of the brain activity and consequently they, in a literal sense, are in the brain" [4]. Numerous data of the neurobiology and neuropsychology testify to this. Certain important areas of a human brain collapse while the consciousness varies essentially or disappears altogether (see, for example, [4–6]).

Use of the economy law or Occam's Razor [7] means, that only the established facts of physics, neurobiology, medicine and some other scientific disciplines will be used as arguments. Thus, we will try to rely on this "minimum", i.e., we will do without employment of the forces form the other world, mythical fields and unreasonable hypotheses, and, in other words, without fantasies.

Besides, other important factors in the consideration will be a full electronic interpretation of the brain functioning and a complex hierarchical approach to its research, proposed by the author, and based on a multilevel modelling in combination with the experimental methods, presented in detail in the works [8–13] and supplemented in the article [14] and the review [15]. I should point out, that many ideas of these works concerning the brain in general will be also used here, but already with reference to the human consciousness.

Problems and approximations

The problems begin with the definition of the concept of "consciousness". The author found a lot of versions in literature. Unfortunately, practically all of them have their draw-

backs (excessive generality, floridity, complexity, etc.), which seem to be a consequence of the special many-sided character of the considered phenomenon of Nature and, most likely, are inevitable. Apparently, the most successful and compact definition is the one presented in a monographic textbook, I quote [4]: "The consciousness is the internal flow of the subjective experiences, which is present directly in us and constantly reveals itself to us".

Strictly speaking, during consideration of the phenomenon of "consciousness", it is necessary to analyze the following full system [15]: brain — other components of the nervous system — body — environment. This is connected with the fact that a brain, just like a human organism as a whole (Introduction), is an open, dynamic and self-organizing subsystem. And although according to the accepted idea of the internalism, the consciousness is a brain product, it is also undoubtedly influenced by the other components of the full system, at that, this influence is not unilateral and can be essential. Moreover, during an analysis of the consciousness of a concrete person in a concrete moment of time it is necessary to set the initial data about this system or, at least, full information concerning the brain in the corresponding moment of time. This is hardly possible experimentally. At the same time modeling of the *whole* of the background of development of a brain till the corresponding moment of time is a problem of fantastic complexity and it will also hardly be solved sometime [8].

Therefore, a logical and natural way is a transition to the approximate description of such supercomplex objects as the human brain and the consciousness, in particular. I should point out at once, that there can be many approximations in a description of consciousness. And this is normal, because we talking about the problems, which in mathematics are called intractable of *NP* class [8], i.e. problems of a special degree of complexity.

According to the accepted "the central dogma" of neurobiology, first of all, we will connect the consciousness with a complex of the physical and chemical processes going on in a live human brain and supporting this kind of activity. In the light of what was said above, already this statement is an approximation. Is a description of at least this kind of activity possible? The answer is extremely simple: "Hardly". And there are, at least, two fundamental reasons or problems here: 1) apparently, it is impossible to separate the conscious activity of a brain from the other its numerous functions, mental, first of all, occurring at the same time in parallel, and, most likely, with crossings, i.e. interaction takes place (problem of "uncoupling", see hereinafter, "flexibility of bonds"); 2) the models (idealisations) cannot correspond fully to the objects, the more so, to such complex ones, as human brain and consciousness.

Speaking about the first problem, apparently, its, at least, approximated solution is possible only with application of modelling. The second problem reflects a purely philosophical point of view. In [16] the author called it "the problem of the first step" or beginning of idealisation, and, unfortunately, it cannot be solved in the science, which uses models. Hence, any mathematical modelling of the brain functioning will be approximated. At the same time, absence of a clear and accurate definition of the concept of "consciousness" complicates the situation.

Thus, it is necessary to accept the fact that *the exact description of the human consciousness is impossible in principle, and we are compelled to pass to its approximated description*.

Exactly the impossibility of an accurate description of the consciousness will provide "a fundamental basis for infinite speculations" in the style of "we do not understand something in human consciousness, there is something mysterious here". In order to cool the excitement or pleasure of the sceptics, dogmatists, charlatans and so forth, I will present only two arguments [8]. Firstly, the brain only approximately reflects, or, to be more exact, reconstructs, what really occurs in Nature. Therefore, is it necessary to describe it precisely? The obvious answer is "No". Secondly, even in much simpler device of electronics, such as a TV set, we do not know the behaviour of this or that electron in the device functioning, and we will never learn that, according to the principles of the quantum mechanics, and Heisenberg's uncertainty principle, in particular. Nevertheless, we understand, how the TV set works, we can make it and repair it. In this connection the main and real purpose of studying of the phenomenon of "consciousness", which should, as it seems to me, be posed, is treatment of various mental diseases; in this case it is the disorder of consciousness. I think, that for this purpose an approximated description of the human consciousness is quite enough, because it is really achievable. The success of the human brain medicine testifies to this.

In the light of everything stated above, all the existing theories of consciousness (a good review of the data on consciousness and a systematic presentation of the corresponding theories are given in [4]) should be considered as approximated ones, at that, frequently enough they are rough or simply wrong. Therefore, the attempts for realisation of the exact copies of the human consciousness with a view of their transfer to a computer (a certain version of immortality) should be perceived as a great exaggeration of the real possibilities.

So, which understanding of the human mental functions, including consciousness, will be the most adequate? According to the author, it is the following formulation: "Mental functions, including consciousness, are determined by the energy flows in a human brain, which ensure the corresponding kind of activity". Unfortunately, such an understanding cannot be strictly described even by one of the fundamental reasons specified above. Approximations are still compulsory.

As the most promising for development we will consider the point of view, which became canonical in the neurosciences. Thus, according to the neurophysiological data, the information processing in the brain, as well as various mental functions, are connected with the work of the neural ensembles (hereinafter, circuits). In particular, with reference to the case in point, it is promising to use the concept of research of the neuronal correlates of consciousness (NCC), consisting in the definition of "what are the minimal sufficient volumes of the neurons or activity of the nervous system, which necessarily accompany this or that realised experience" [4].

I have to point out, that in this case the principal importance is given to the nervous cells — neurons, and only auxiliary functions are recognized for the other type of the brain cells — neuroglia. Although this assumption also provokes strong objections from certain experts [17], the extensive research undertaken in a number of special brain disciplines tes-

tifies to its admissibility [18–20]. And nevertheless, it is clear, that the concept of NCC is an approximation to what actually occurs and is a result of already several steps of assumptions.

Notwithstanding the achieved indisputable success in the neurosciences (neurophysiology, neuropsychology, etc.), unfortunately, at the present moment, there is no universally recognized and causing no doubt theory of consciousness [4], which could be explained by the above-mentioned objective and very serious complexities. However, I will single out the principles from these sciences, most valuable for the further consideration, namely:

1. Principles of higher nervous activity [21]: reflex, dominant, reflection and system activity of the brain.

2. "Even the simplest mental function is a result of the integrative activity of the entire brain" [21].

3. "...The structural basis for the cerebral functions is ensured by the distributed systems. Each function is determined by a certain combination of the cortical and subcortical centers" [18].

Thus, the brain as a whole is a locally-distributed system. Therefore, considerable efforts have been made in order to single out in a brain the subsystems, responsible for these or those functions. From the point of view of the author, the most successful are two partitions [5, 22].

So, the Luriya's theory of the system dynamic localisation of the higher mental functions (memory, perception, thinking, speech are traditionally referred to them) is important. According to the structurally functional model of a brain as a substratum of the mental activity it is divided into three main units (subsystems), namely [5]:

1) A unit for regulation of the level of the brain activity;
2) A unit for reception, processing and storage of the information coming from the external world; 3) A unit for programming, regulation and control of the mental activity. The most important component of the third unit is the prefrontal cortex. A. R. Luriya also pointed out, that any higher mental function is carried out with the assistance of all the singled out units (subsystems).

Another and more modern partition was proposed by Doctor D. Amen, well-known American neurophysiologist and neuropsychiatrist, one of the pioneers of the use of the computer tomography in psychiatry. He divided a brain into five subsystems*, namely [22]: 1) deep limbic subsystem; 2) basal ganglia; 3) prefrontal cortex; 4) cingulate subsystem; 5) temporal lobes of a brain. Amen also underlines, that the subsystems do not exist separately. "They are connected among themselves by millions of complex bonds. Each time, when one system* is injured, the other ones, most likely, will also be involved in the process" [22]. The applied method of visualisation of a brain allowed us not only to single out its subsystems, but, which is the most important, to develop on this basis rather effective therapeutic methods for treatment of many mental frustrations of concrete patients. In my opinion, the given approach has good prospects in psychiatry, especially in the process of improvement of the qualities of the tools for visualisation of a human brain. As a whole, despite all the conditionality of the partition of a brain into subsystems, it will also be useful, at least, at the initial stages of mod-

* D. Amen uses the term "system". The term "subsystem" will be more accurate for us.

elling of various brain functions. Should we at once model the whole of the brain during consideration of separate mental functions? However, it will hardly be possible (see further).

Full electronic interpretation of the brain functioning

As it has already been mentioned, the conscious activity is determined by all the complex of the physical and chemical processes, which go on in the human brain and ensure its support. Unfortunately, it is a "tangle" of numerous processes. Strictly speaking, they are influenced by all the forces of Nature. Since we connect the mental functions with functioning of the neural circuits, then the following interconnected processes can render influence on their work: the electric, chemical, mechanical, thermal and other processes. I should point out, that traditionally in neurobiology they single out the chemical and electric processes [18, 19] (therefore, quite often, a brain is called "an electrochemical device"), at that, as a rule, the preference is given to the chemical ones. From what was said above it is clear, that they can actually be only the usually dominating processes. Even in case of such simplification it is still difficult to "unwind" the remaining "tangle".

For an attempt to do this, a full electronic interpretation of the human brain functioning [8–15] is offered.

As its basis, hypothesis 1 was accepted: it is considered, that the dominating influence on the brain functioning is rendered by the electric processes. Thus, it is assumed, that the information processing in a brain goes basically at the level of the electric processes. The chemical processes ensure a power supply of the electric (neural) circuits of the brain, and also their modification.

It was demonstrated, that *the whole* neural circuit of the brain can be interpreted as a nonlinear electric circuit (the first type), possessing the following basic properties: 1) At first a neural circuit is a growing and then a modifying electric circuit (the main difference from the integrated circuits (IC) of the solid-state electronics — electric circuits of the second type); 2) A nonlinear electric circuit of the first type is characterised not only by an extremely complex topology, but also by a variation of properties of its components, which seem to be the same type of elements (bodies of cells, axons, dendrites, spinules, synapses, etc.); 3) The electric circuits of the first type can demonstrate a big variety in their behavior, depending on both the incoming signals and the signals passing through them; 4) From the point of view of electronics, the brain of an adult person is, first of all, a set of nonlinear electric (neural) circuits of two kinds, which should not be modified and which can be modified.

The key (active) elements in the electric (neural) circuits of the brain are the ionic channels. In this connection I will present several quotations from a brilliant textbook on neurobiology, namely [19]: "For a successful functioning of the nervous system, the neurons should possess a very diverse repertoire of the electric activity... In the long run, all these versions depend on activation or deactivation of the ionic channels regulating the ionic currents through the membranes of the nervous cells". A certain contribution to the transfer of ions is also made by the other channels (carriers) — ionic pumps, exchangers [19]. And nevertheless, "it is necessary to consider the ionic channels as the systems conducting the

electric signals, and the carriers — as the systems ensuring the basic conditions, which make such a behaviour possible" [19]. I should point out, that already now a big number of various types, kinds and subsorts of channels [19, 23] are known.

The ionic channels are complex nano-electromechanical systems (NEMS) [8]. This is connected with the following principal reasons: 1) the characteristic sizes of all the structures forming the ionic channels, are within the nanometer range [19, 23]; 2) the conformational transitions of the proteins and/or their subunits (domains), leading to passing of the ions, are the processes initiated by the electric signals, in which the mechanical forces [23] are important. The physics of these transitions is rather complex [23], however, the most interesting thing is that these NEMS can control the passage of separate ions (the basic ones are the ions of potassium, sodium, calcium and chlorine) with characteristic sizes already in the angstrom units, i.e. less than 1 nm. The other channels are also complex NEMS, the ionic pumps, in particular.

Hence, *according to the proposed interpretation, the active elements are different channels, i.e. NEMS, conducting the ions and defining the brain electronics, while the brain as a whole can be considered as an object of organic hybrid nanoelectronics* [8, 16]. In this connection I will point out the basic difference from IC of the solid-state micro- and nanoelectronics, in which the active elements are diodes and transistors. Thus, Nature opted for a qualitatively different way. At the same time the neurons themselves, forming the neural circuits, are already much more complex integrating devices, and, figuratively speaking, their analogues are whole IC. Therefore, the interpretation of the neurons as the basic active elements of the brain (in neuronsciences a neuron is frequently compared to a transistor) is a great simplification from the point of view of the electronics. Everything is much more complex.

It is interesting to estimate, at least roughly, the level of integration of a human brain as an object of electronics. The estimation is done, as is customary in the micro- and nanoelectronics, by the number of the active elements. Since the number of the neurons in the brain is about 10^{11} , the number of the channels conducting ions, i.e. active elements, will be roughly by 8–10 orders more*, i.e. we are talking about figures in the range of $10^{19} \dots 10^{21}$. Now, we can correct the assessment of the work [2] (Introduction) of the total volume of information by the number of the possible states, but already the number of the channels (open-closed) is equal to 2^{MK} , where M — number of channels (we take the bottom limit of $M = 10^{19}$), K — number of the generations of actuation ($K \gg 1$), i.e. we have even a much more grandiose figure. Hence, the human brain is an object of nanoelectronics of a fantastic level of integration. No wonder, that exactly such a system — a masterpiece of electronics created by Nature, — also generates the consciousness (with the specified reservations). It is easy to notice, that a rigorous modelling of such a system and in the given approximation is also impossible [8].

An approximate functioning of the human brain was considered within the framework of the proposed full electronic interpretation. In particular, three types of the operating

* Unfortunately, the author could not find the necessary data in literature. The estimation is made by the number of ionic channels in the axon of squid $\sim 10^{10}$ [24].

modes of the brain as a set of nonlinear electric circuits, were named: 1) under an external influence; 2) without an external influence (internal); 3) mixed. All the separate operating modes, including perception, recollection, thinking and other mental functions, belong to one of the specified types. At the same time *any specific operating mode of a live brain, including the mental functions, is a result of the passage of an electric signal (signals) through the corresponding set of the electric (neural) circuits**, which integrates the modes, i.e. is a common feature for all of them. At that, the basic operations are comparison, coding, decoding, action command, and modification of the neural circuits.

In particular, a thought is a decoding (internal reproduction) of the electric signal (signals), initiated by the brain and passing via various neural circuits of the brain of the corresponding spatio-temporal configuration [8, 11]. Hence, a thought is an original reverse process in relation to the processing of the arriving information (direct process), which is initiated, apparently, mainly by the cerebral cortex, i.e. the currents go via the neural circuits, causing a decoding of the information contained in the corresponding neural circuits.

In psychology there are two systems of thinking [25]: system 1 (automatic) and system 2 (arbitrary). "System 1 works automatically and very quickly, it requires no effort or almost no effort, without a feeling of the intended control. System 2 uses the attention, necessary for the conscious intellectual efforts, including complex calculations. Actions of system 2 are often connected with a subjective sensation of activity, choice and concentration... System 1 is impulsive and intuitive, while system 2 is capable to reasonings..." [25]. It is possible to assert, that the automatic system functions at a subconscious level, while the arbitrary system — with participation of an awareness.

It is convenient to present the cognitive activity as a whole occurring by a "spiral" (one of the possible versions of "a flow of consciousness"***). So, one turn of a spiral of the work of the automatic system (system 1) is presented on fig. 1. First comes planning (modelling or prediction) of a situation, and then — action. The process can go on further. The work of the arbitrary system (system 2) is more varied and complex. Several versions of one turn of a spiral are presented in fig. 2. In the first version (fig. 2, a) planning (modelling or prediction) of a situation comes first, then — action (its control of the brain, to be more exact), and after that — awareness. Exactly this version caused the most turbulent discussion in the neurophysiological literature (the well-known Libet experiments of 1980s concerning "the free will" [2]). Action comes first, and then — awareness. However, I should point out, that, first of all, the awareness is necessary for realisation of the control and managing functions, and can be switched on at various moments of time of "the spiral" of the cognitive activity, in attempt to make it more effective and qualitative. A simpler version of the work of system 2 is also possible (fig. 2, b). Planning (modelling or prediction) of a situation, and then — awareness.

* This set of circuits for the mental function can be called a neural correlate of the mental function (NCMF) by analogy with NCC.

** The term was introduced by W. James, outstanding American psychologist and philosopher.

It is obvious, that very complex "spirals" of the cognitive activity can only be generated from the above versions of the turns of spiral. It is also necessary to point out, that the situations and actions themselves can be divided into components (split into pieces), which complicates consideration of the process of thinking even more.

I should underline, that the consciousness is, undoubtedly, a systemic, integrative property of the human brain, which is supported by many areas, however, an analysis of numerous (mainly experimental) data of the neurosciences (neurophysiology, neuropsychology, etc.) allows us to draw a conclusion, that, apparently, the area, first of all responsible for the awareness, is the prefrontal cerebral cortex. Hence, the initiation and possible follow up of the cognitive activity in case of work of system 2 occurs in the neural circuits of this area, and then a flexible linkage is carried out with the neural circuits of various structures and areas of the brain, depending on the character of the thought. If this thought provokes any action, then for its awareness the information should come for processing to the prefrontal cerebral cortex. As a result there is a natural delay, which explains the Libet experiments (see Part II), also a slower and less efficient functioning of system 2 in comparison with the economic system 1 characterised by a mass parallelism in the work.

The flexibility of linkage is reached, at least, at three levels [14]: 1) the bonds between the areas and/or structures of the brain; 2) the neural ensembles (various neural ensembles can participate in the work in the areas and structures of the brain); 3) neurons (the neurons themselves are also multi-functional). And this means, that the support to different mental functions can be provided by the same areas (their subareas), neural circuits (their elements), and, apparently, even separate neurons. This complicates greatly the analysis and leads to a problem of "uncoupling" of the mental functions (see earlier).

According to the stated above, in my opinion, a sharp contradistinction of the conscious and subconscious activities of the brain is incorrect. The basic distinction consists mainly in the fact that in case of the work of system 2 the participation of the neural circuits of the prefrontal cerebral cortex, responsible for awareness, is necessary.

Consequently, a conscious thought is a decoding (internal reproduction) of the electric signal (signals), initiated by the brain itself and passing via NCC of the brain of the corresponding spatio-temporal configuration, i.e. the currents pass through the neural circuits, causing appearance of images, concepts, etc. as a result of decoding of the information, contained in the corresponding neural circuits. Thus, *usually, thinking is an internal perception by a person of the information coded in the brain itself* [8, 11], and "the cognitive activity, apparently, is the essence of the macroscopic collective phenomena in the nonlinear electric circuits of the first type" [8, 13], i.e. *a thought in the human brain is material! And, as it follows from the above, the other mental functions are also material.*

In accordance with the classification [4], the proposed theory within the framework of the full electronic interpretation of functioning of the human brain can be referred to the monistic materialistic theory of consciousness of the emergent type [14]. I should point out, that in the given theory it becomes clear, what a thought is. I think that the presented definition of a thought is quite a good approximation to the truth.

At the same time the opinion of the neuroscientists on the question considered in the work as a whole is quite well expressed in the following citation [26]: "We can assert, that the consciousness and the brain correlate from the point of view of the functions, however, we actually do not know, in which ways the brain activity and the functions of consciousness mutually create each other.

References

1. **Hippocrates.** Izbrannye knigi. Kniga "O svjashchennoj bolezni". Moscow, Gos. izd. biol. i med. literatury, 1936. 736 p. (in Russian).
2. **Kaku M.** *The future of the mind: The scientific quest to understand, enhance, and empower the mind*, New York, Doubleday Publishers, 2014. 400 p.
3. **Bloom F. E., Lazerson A., Hofstadter L.** *Brain, mind, and behavior*, New York, Educational Broadcasting Corp., 1985.
4. **Revonsuo A.** *Consciousness. The science of subjectivity*. Hove and New York, Psychology Press, Taylor & Francis Group. 2010. 324 p.
5. **Luria A. R.** *Osnovy nejropsihologii*, Moscow, Izd-vo MGU, 1973. 375 p. (in Russian).
6. **Homskaya E. D.** Nejropsihologija, Moscow, Izd-vo Mosk. universiteta, 1987. 288 p. (in Russian).
7. **Novaja filosofskaja jenciklopedija:** V. 3. Moscow, Mysl', 2010. 692 p. (In Russian).
8. **Abramov I. I.** *Mozg kak obekt jelektroniki*, Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 80 p. (in Russian).
9. **Abramov I. I.** *Brain as an object of electronics*, Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 76 p.
10. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organiceskoy gibrindnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' I, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 1, pp. 52—54 (in Russian).
11. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organiceskoy gibrindnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' II, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 3, pp. 45—53 (in Russian).
12. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organiceskoy gibrindnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' III, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 5, pp. 45—54 (in Russian).
13. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organiceskoy gibrindnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' IV, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 6, pp. 49—53 (in Russian).
14. **Abramov I. I.** Prospects of nanoelectronics, nanomaterials and nanotechnologies in research and medicine of the human brain, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, no. 1, pp. 49—64.
15. **Abramov I. I.** Mozg cheloveka — shedevr estestvennoj jelektroniki, Problemy i perspektivy issledovanija, *Materijaly Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. "Aktual'nye problemy radio- i kionotekhnologij"*, 2017, Saint-Petersburg, 2017, pp. 79—86 (in Russian).
16. **Abramov I. I.** Problemy i principy fiziki i modelirovaniya pribornyh struktur mikro- i nanojelektroniki. I. Osnovnye polozhenija, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2006, no. 8, pp. 34—37 (in Russian).
17. **Koob A.** *The root of thought*, Pearson Education, 2009.
18. **Shepherd G. M.** *Neurobiology*, New York, Oxford University Press Inc., 1983.
19. **Nicholls J. G., Martin A. R., Wallace B. G., Fuchs P. A.** *From neuron to brain*. 4-th ed. Sunderland, Massachusetts, Sinauer Associates, Inc. Publishers, 2001.
20. **Cognition, brain, and consciousness.** Introduction to cognitive neuroscience. Second Edition / Eds. by B. J. Baars, N. M. Gage. Amsterdam, Elsevier, 2010, 658 p.
21. **Batuyev A. S.** *Fiziologija vysshej nervnoj dejatel'nosti i sensornyh sistem: Uchebnik dlja vuzov*, Saint Petersburg, Piter, 2010, 317 p. (In Russian).
22. **Amen D. G.** *Change your brain, change your life*, New York, Penguin, 1998.
23. **Jackson M. B.** *Molecular and cellular biophysics*, Cambridge University Press, 2006.
24. **Antonov V. F., Kozlova E. K., Chernysh A. M.** *Fizika i biophysika: uchebnik*, Moscow, GJeOTAR—Media, 2013, 472 p. (in Russian).
25. **Kahneman D.** *Thinking, fast and slow*, New York, Farrar, Straus and Girous, 2011.
26. **Siegel D. J.** *The mindful brain. Reflection and attunement in the cultivation of well-being*, New York, London, W. W. Norton & Company, 2007.

Рисунки к статье В. В. Амеличева, А. А. Резнева

«МИКРОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТОКА»

V. V. Amelichev, A. A. Reznev

«MICROSYSTEMS BASED ON THIN-FILM ANISOTROPIC MAGNETORESISTIVE CONVERTERS OF MAGNETIC FIELD AND CURRENT»

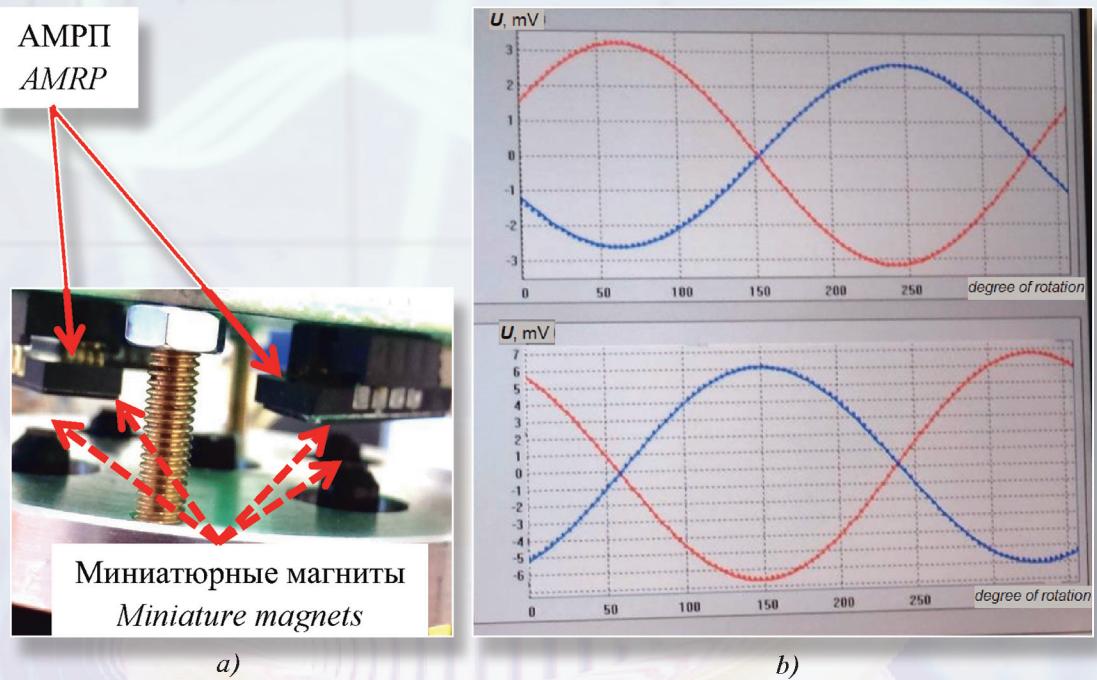


Рис. 4. Фотоснимок фрагмента макета ДУП на основе четырех ортогональных AMP (а) и форма выходного сигнала (б)

Fig. 4. Photograph of the fragment of the layout of the DUP on the basis of four orthogonal AMRP (a) and output waveform (b)

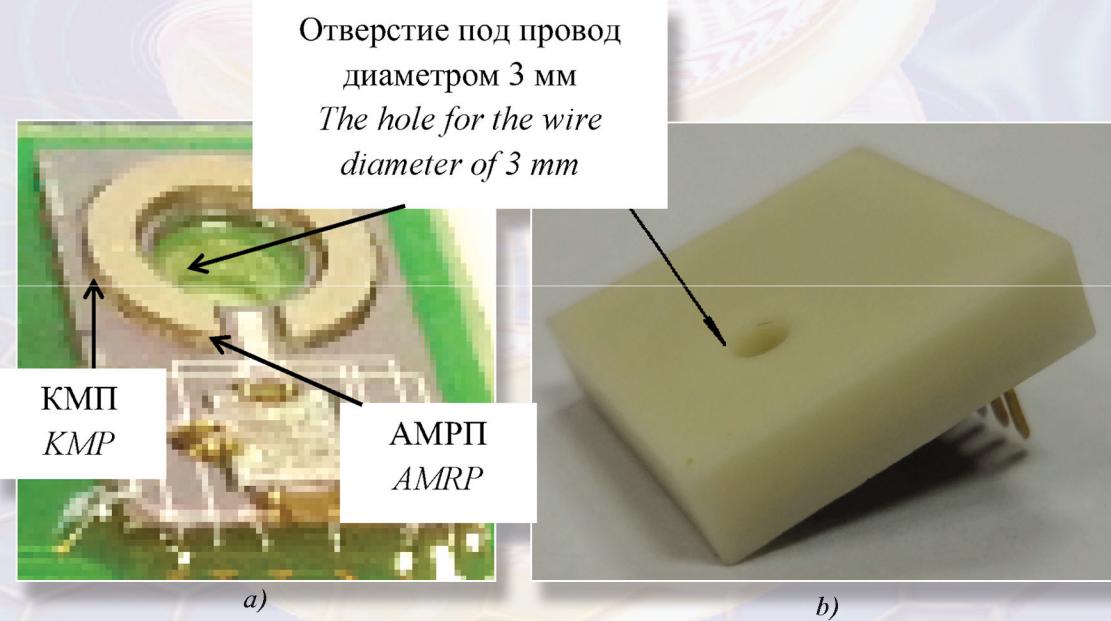
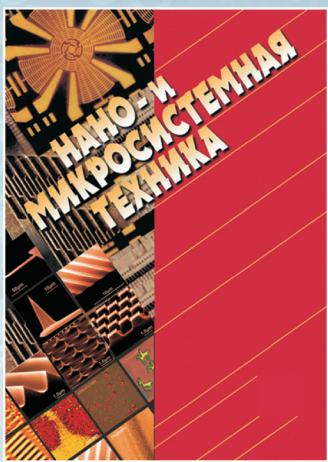


Рис. 5. Фотоснимок кристалла AMP тока (а) и внешний вид керамического корпуса, в который он монтируется (б)

Fig. 5. Photograph of the AMRP current crystal (a) and the appearance of the ceramic housing in which it is mounted (b)

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

выпускает научно-технические журналы



Ежемесячный междисциплинарный теоретический
и прикладной научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано-микросистем в различные области науки, технологий и производства.

Подписные индексы по каталогам:

«Роспечать» – 79493; «Пресса России» – 27849



Научно-практический
и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписные индексы
по каталогам:
«Роспечать» – 79963;
«Пресса России» – 94032



Ежемесячный теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

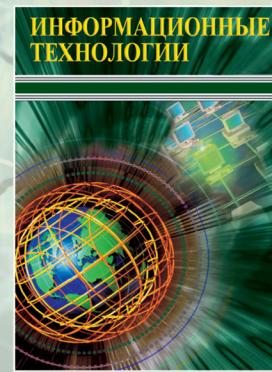
В журнале освещаются достижения в области мехатроники, интегрирующей механику, электронику, автоматику и информатику в целях совершенствования технологий производства и создания техники новых поколений. Рассматриваются актуальные проблемы теории и практики автоматического и автоматизированного управления техническими объектами и технологическими процессами в промышленности, энергетике и на транспорте.

Подписные индексы
по каталогам:
«Роспечать» – 79492;
«Пресса России» – 27848

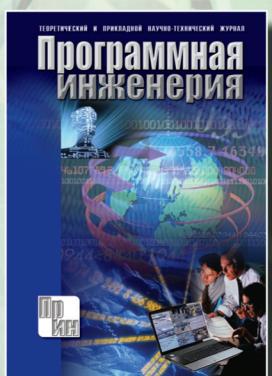
Ежемесячный теоретический
и прикладной научно-
технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.



Подписные индексы
по каталогам:
«Роспечать» – 72656;
«Пресса России» – 94033



Теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояния и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.

Подписные индексы
по каталогам:
«Роспечать» – 22765;
«Пресса России» – 39795

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:
107076, Москва, Строгинский пер., 4. Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".
Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10. E-mail: antonov@novtex.ru