

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

ISSN 1813-8586

Том 20. № 6. 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. 6, 2018

The articles are published
in Russian and English

Рисунки к статье С. И. Торгашина, В. Е. Пауткина
«МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ КРАТЕРОВ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ
ПРИ АНИЗОТРОПНОМ ТРАВЛЕНИИ В РАСТВОРЕ ГИДРОКСИДА КАЛИЯ»

S. I. Torgashin, V. E. Pautkin
«MECHANISM FOR FORMATION OF CRATERS ON THE SURFACE OF SILICON
DURING ANISOTROPIC ETCHING IN A SOLUTION OF POTASSIUM HYDROXIDE»

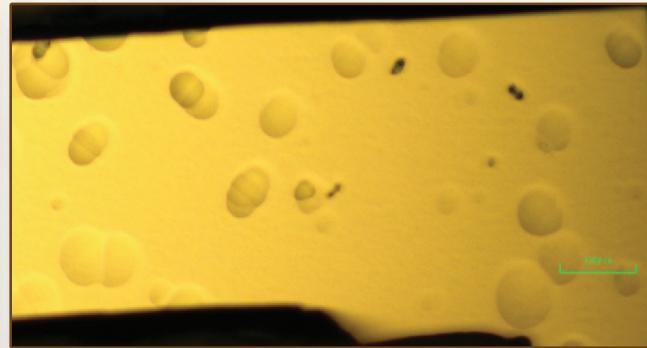
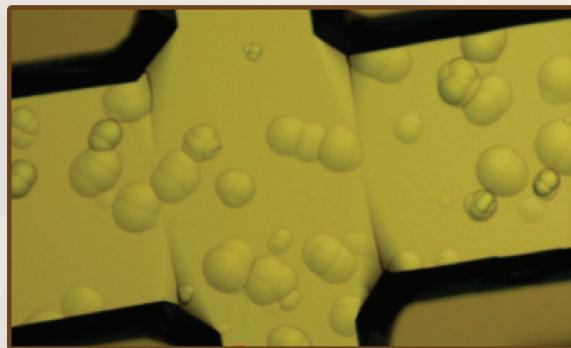


Рис. 1. Появление кратеров эллиптической формы на травленой поверхности кремния

Fig. 1. Occurrence of the elliptic-form craters on the etched surface of the silicon

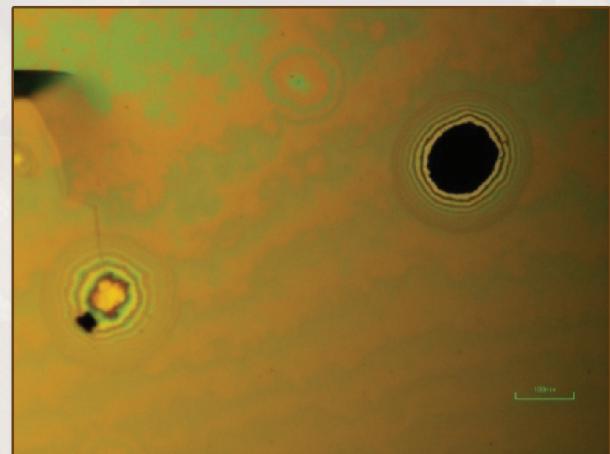
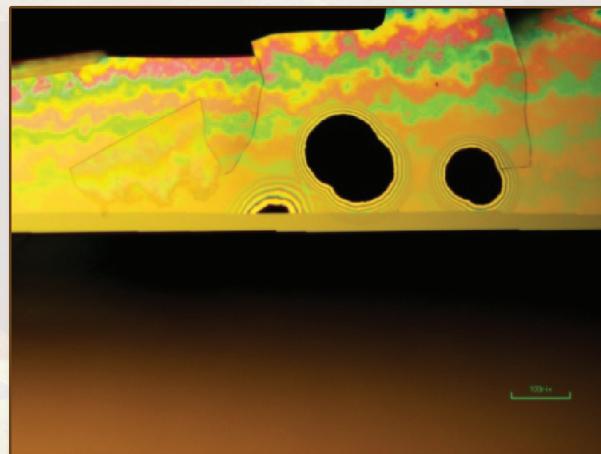


Рис. 3. Появление микроотверстий в местах расположения кратеров травления

Fig. 3. Occurrence of the microapertures in the locations of the craters of etching

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 20. № 6 ◆ 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.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Торгашин С. И., Пауткин В. Е. Механизм формирования кратеров на поверхности кремния при анизотропном травлении в растворе гидроксида калия 323

Васильев В. Ю. Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 2. Термически активированные процессы в реакторах циклического действия 329

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Салгаева У. О., Хасаншина А. Р., Козлов А. А., Кондаков А. А., Волынцев А. Б., Моисеева Е. В. Чувствительный элемент на основе интегрально-оптического кольцевого резонатора и одномерного фотонного кристалла для датчиков физических величин 340

Серов В. Н., Фетисов Л. Ю., Фетисов Ю. К., Чашин Д. В. Магнитоэлектрический датчик постоянных магнитных полей компенсационного типа с расширенным линейным диапазоном 350

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Ануфриев Ю. В., Зенова Е. В., Воронков Э. Н. Оценка перспективы применения бета-электрических батарей в микромощных автономных устройствах 356

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

Абрамов И. И. Сознание человека, или возможности электроники. Часть II 368

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. 6
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)

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

CONTENTS

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

- | | |
|--|-----|
| Torgashin S. I., Pautkin V. E. Mechanism for Formation of Craters on the Surface of Silicon during Anisotropic Etching in a Solution of Potassium Hydroxide | 327 |
| Vasilyev V. Yu. Silicon Nitride Thin Film Deposition for Microelectronics and Microsystem Technologies. Part 2. Processes in Cycle-Type Reactors with Thermal Activation | 336 |

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

- | | |
|---|-----|
| Salgaeva U. O., Hasanshina A. R., Kozlov A. A., Kondakov A. A., Volyncev A. B., Moiseeva E. V. Sensitive Element Based on the Integrated Optical Ring Resonator and One-dimensional Photonic Crystal for the Sensors of the Physical Values | 347 |
|---|-----|

- | | |
|--|-----|
| Serov V. N., Fetisov L. Yu., Fetisov Yu. K., Chashin D. V. Magneto-electric Compensation Type Sensor of Permanent Magnetic Fields with Extended Linear Range | 354 |
|--|-----|

APPLICATION OF MNST

- | | |
|--|-----|
| Anufriev Yu. V., Zenova E. V., Voronkov E. N. Estimation of the Prospects for the Beta Voltaic Batteries in the Micro-Power Autonomous Devices | 364 |
|--|-----|

MOLECULAR ELECTRONICS AND BIOELECTRONICS

- | | |
|---|-----|
| Abramov I. I. Human Consciousness, or Possibilities of Electronics. Part II | 378 |
|---|-----|

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)

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

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

УДК 546.28

DOI: 10.17587/nmst.20.323-329

С. И. Торгашин, канд. техн. наук, директор по производству, e-mail: teslananoel@rambler.ru,
В. Е. Пауткин, канд. техн. наук, гл. специалист, e-mail: inercial@niifi.ru,
АО "Научно-исследовательский институт физических измерений", г. Пенза, 440026,
Российская Федерация

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ КРАТЕРОВ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ПРИ АНИЗОТРОПНОМ ТРАВЛЕНИИ В РАСТВОРЕ ГИДРОКСИДА КАЛИЯ

Поступила в редакцию 04.12.2017

Исследованы дефекты травленой поверхности кремния в виде кратеров, возникающие при глубинном травлении в растворе гидроксида калия при формировании кристаллов микромеханических датчиков. Рассмотрены возможные механизмы формирования кратеров. Определены факторы, влияющие на источники возникновения дефектов, предложены варианты минимизации нарушения морфологии поверхности кремния при глубинном травлении.

Ключевые слова: анизотропное травление, МЭМС-датчики, дефекты поверхности, кратеры травления, дислокации, упругие напряжения

Введение

Анизотропное химическое травление кремния остается наиболее широко используемым методом объемной микрообработки в технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). В сочетании с другими технологическими процессами, заимствованными из технологии интегральных микросхем (ИМС), такими как термическое окисление, осаждение слоев, диффузия примеси и др., оно имеет широкий диапазон применений при изготовлении МЭМС-датчиков давления, ускорения, угловых скоростей и пр. [1–3]. Наиболее широко используемым щелочным травителем является водный раствор гидроксида калия KOH различной концентрации, получивший распространение благодаря своим свойствам — доступности, нетоксичности, простоте применяемого оборудования и технологической оснастки, обеспечению формирования гладких поверхностей без физического воздействия на обрабатываемый материал.

Качество травленой поверхности кремния начинает играть все более важную роль, так как размеры элементов МЭМС постоянно уменьшаются. Современные МЭМС требуют формирования очень гладких поверхностей и точного соблюдения режимов технологических процессов изготовления. Например, шероховатость поверхности должна

быть очень низкой по сравнению с размером формируемого микромеханического объекта. Это требует учета многих факторов одновременно: от частоты травителя до ориентации кремниевой пластины и, что особенно важно, наличия дефектов на ее поверхности после травления. Вследствие этого понимание процессов образования дефектов на поверхности кремния является важной задачей при изготовлении микромеханических приборов. Зная механизмы дефектообразования, можно управлять технологическими процессами для их снижения и получения качественных кремниевых микроструктур.

В связи с этим вопросы формирования кремниевых структур с качественными бездефектными травлеными поверхностями имеют важное значение в технологии изготовления микромеханических приборов. Решение данной задачи способствует получению надежных микромеханических приборов, имеющих улучшенные метрологические и эксплуатационные характеристики.

В данной работе приводятся результаты проведенных практических работ по глубинному травлению кремния при формировании кристаллов микромеханических датчиков, представлены наблюдаемые нарушения травленой поверхности кремния, а также дан анализ возможных механизмов образования дефектов.

Экспериментальная часть

Микромеханические датчики, такие как акселерометры, содержат кремниевый чувствительный элемент. Кремниевый кристалл чувствительного элемента выполняют на пластинах кремния ориентации (100) методом анизотропного травления кремния в растворе KOH, при этом стенки формируемых кремниевых микроструктур представляют собой кристаллографические плоскости (100) и (111).

Кремниевые пластины с двусторонней полировкой марки ЭКЭС-0,01 толщиной 400 ± 20 мкм, служащие для формирования структур микромеханических датчиков, предварительно проходили химическую обработку для удаления органических и неорганических загрязнений. После этого пластины окисляли термическим методом. По сформированному слою диоксида кремния проводили фотолитографию для создания топологии формируемых микроструктур. После этого пластины кремния помещали в раствор KOH, температура которого находилась в диапазоне 95...98 °C. Травление проводили на глубину от 100 до 150 мкм.

После проведения операции травления на поверхностях (100) и (111) формируемых структур наблюдались дефекты в виде кратеров. Данные дефекты легко наблюдались в микроскоп стереоскопический МССО в падающем свете при увеличении $\times 16$. Определено, что их распределение по площади кремниевой пластины носило случайный характер.

Поверхность (100)

Поверхности кремния ориентации (100) содержали кратеры, как показано на рис. 1 (см. вторую

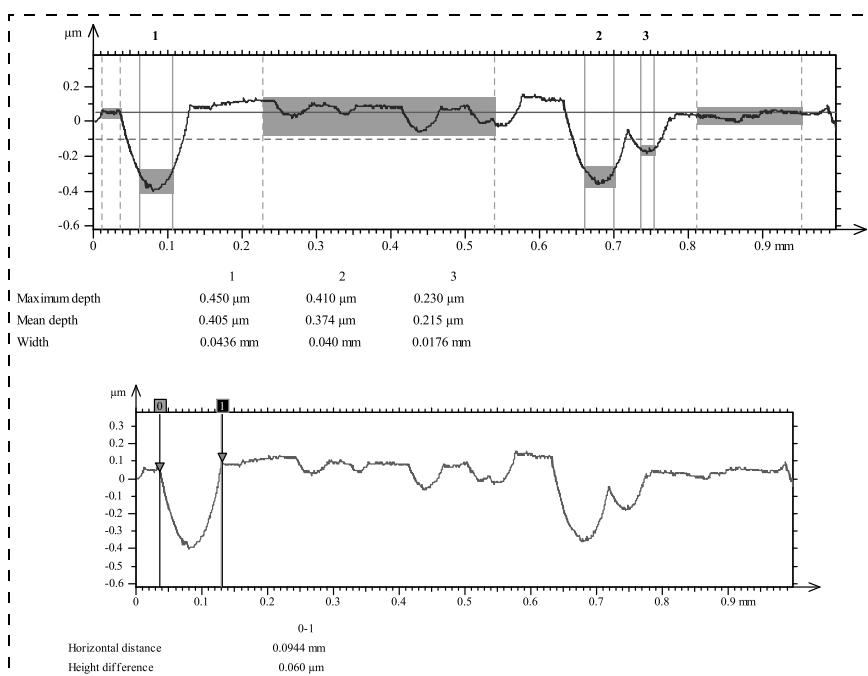


Рис. 2. Профилограммы травленой поверхности кремния (100), содержащей кратеры
Fig. 2. Profilograms of the etched surface of the silicon (100) containing craters

сторону обложки). Кратеры оказывались случайным образом распределенными по поверхности, их диаметр составлял десятки — сотни микрометров, а глубина — от сотен нанометров до микрометра.

Были измерены геометрические размеры кратеров. Их ширина составляла 0,05...0,1 мм при глубине 0,01...0,650 мкм. На рис. 2 показаны примеры измерения профиля травленой поверхности кремния (100), содержащей кратеры указанных размеров. Профилограммы снимались профилометром Mitaka 60PF на длине оценки 1,0 мм.

Из литературных источников хорошо известны дефекты морфологии поверхности при анизотропном травлении кремния. Они представляют собой либо пирамидальные бугорки [4—7], либо неглубокие круглые ямки-кратеры. Как правило, появление таких дефектов обусловлено различными производственными факторами, и они также, как правило, одновременно не проявляются. В обоих случаях плотность поверхностных дефектов (либо бугорков, либо ямок) увеличивается при уменьшении концентрации травителя.

Механизм образования бугорков обычно связывают с локальным микромаскированием кремния посредством закрепленных пузырьков газа (обычно водорода, генерируемого при химической реакции травления) или других частиц, которые приводят к образованию небольших пирамидальных или конусообразных выступов на травленой поверхности [7]. В отличие от данных дефектов, дефекты типа кратеров являются гладкими, с эллиптическими профилями, распространяющимися в глубь травленой поверхности. Кратеры могут создаваться поверхностными повреждениями, которые возникают в результате первоначальной подготовки поверхности.

Существуют две гипотезы, связанные с появлением кратеров. Первая гипотеза основана на том, что указанные кратеры образуются в местах пересечения дислокационных петель плоскостей {111}/<110> с травленой поверхностью (100). Известно, что плоскость (111) травится медленнее, чем другие плоскости, потому что поверхностные атомы на этой плоскости имеют три основные связи, которые должны быть разорваны, в отличие от плоскости (100), атомы которой имеют только две основные связи. Вокруг дислокационных ядер имеется поле упругих напряжений, которое может привести к ослаблению основных связей атомов кристаллической решетки вокруг дислокаций.

ционных ядер и повышенному растворению кремния вокруг дислокаций [8]. Упругое напряжение дислокации увеличивается по мере уменьшения расстояния до ядра дислокаций. Так, согласно [9], для дислокации в анизотропной среде упругая энергия на единицу длины равна

$$E = (K'b/4\pi)\ln(R/r_0),$$

где параметр K' зависит от постоянных упругости материала; b — полное смещение дислокации; R — радиус от ядра дислокации; r_0 — радиус ядра дислокации.

В результате на дислокацию действует сила

$$F_x = -\frac{dE}{dx},$$

где E — энергия, обусловленная наличием дислокации.

Градиент упругого напряжения приводит к тому, что атомы, расположенные ближе к ядру дислокаций, будут удалены быстрее, чем те, которые расположены дальше от ядра.

Это приводит к появлению кратеров эллиптической формы вокруг дислокационных ядер на травленой поверхности. Кремний, выращенный методом Чохральского, может иметь порядка сотен дислокаций на квадратный сантиметр ввиду процессов роста [10]. Эти дислокации могут объяснить появление ямок травления на поверхности кремния (100).

В доказательство того, что наблюдаемые кратеры — это вогнутые внутрь структуры, было проведено дотравливание кремния до возможного появления микроотверстий в местах кратеров. При этом предполагалось допущение, что области дислокаций располагаются произвольно по всему объему кремния. Таким образом, кратеры, расположенные первоначально на поверхности, стравливаются, при этом по мере травления на глубину могут выявляться новые кратеры. Результаты дотравливания образцов кремния представлены на рис. 3 (см. вторую сторону обложки). Они показывают образование микроотверстий в местах расположения кратеров.

Толщина кремния, окружающего микроотверстия, составляла (1,1...1,5) мкм, что коррелирует с данными полученных профилограмм по глубине кратеров, учитывая двусторонний характер травления кремниевых структур.

Предполагается, что отдельные кратеры могут возникать там, где линии дислокаций пересекают травленую поверхность под непараллельным углом. Преимущественно большие кратеры могут

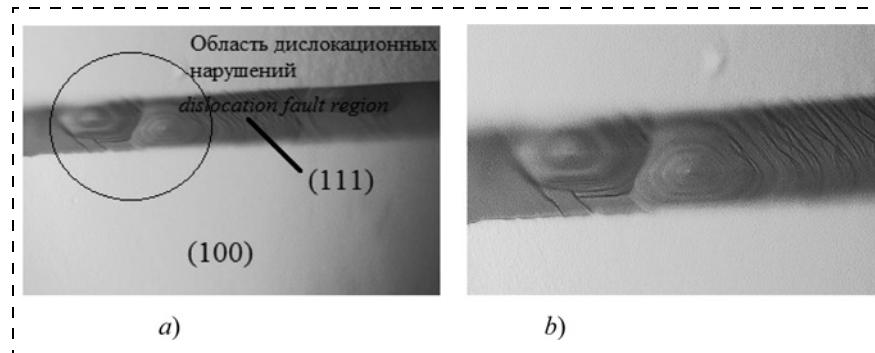


Рис. 4. Фотография плоскости (111), полученная при травлении кремния при различном увеличении: a — увеличение в 100 раз; b — увеличение в 200 раз

Fig. 4. Photo of the plane (111) during silicon etching at various magnifications: a — magnification of 100 times; b — magnification of 200 times

быть сформированы большим полем упругих напряжений, вызванным скоплением множества дислокаций. Линейные массивы кратеров могут быть образованы линией дислокации, проходящей параллельно травленой поверхности или линейного массива дислокационных линий, нормальных к поверхности. Появление таких дислокаций связывают с источником Франка — Рида [11].

Поверхность (111)

В пользу предположения о возникновении дислокаций по источнику Франка — Рида свидетельствует исследование травлений поверхности кремния (111) (рис. 4). Очевидно, что изображение идентично представленному на рис. 5 и описанному в работах [12, 13].

Гипотеза формирования кратеров, вызванных дислокациями, рассмотрена в работах [14, 15]. В данной гипотезе кратеры должны иметь большие конусные формы при травлении ядра дислокаций. Считается, что эта форма конуса должна продолжаться в глубь материала при продолжении травления, в результате чего мелкие конусы должны становиться более глубокими. На практике кратеры не становятся более глубокими, их глуби-



Рис. 5. Электронная фотография дислокаций, вызванных источником Франка — Рида [12, 13]

Fig. 5. Electronic photo of the dislocations caused by Frank—Read source [12, 13]

на остается постоянной и составляет сотни нанометров — единицы микрометров.

Альтернативная гипотеза, объясняющая появление кратеров, основана на том, что травление протекает изотропно внутри кратеров из-за наличия атомной вакансии в кристаллической решетке кремния и включения в объем кремния микропустот в процессе выращивания слитка. Известно, что в кремнии, выращенном по методу Чохральского, при быстром выращивании слитка могут накапливаться дефекты в виде вакансий и формировать случайно распределенные октаэдрические пустоты внутри объемного кремния [16]. Накопление атомных вакансий может привести к локальному разрушению кристаллической структуры, что позволяет травить кремний изотропно во всех направлениях вокруг дислокационных ядер. Если растущий слиток слишком быстро вытягивается из расплава, то дефекты охлаждаются медленно, что кинетически предотвращает их рекомбинацию с атомами в междоузлиях и приводит к их накоплению и появлению октаэдрических пустот, достигающих примерно 100 нм. Эти дефекты остаются в кремнии после обработки слитка, их случайное распределение совпадает со случайнм распределением кратеров, равномерный размер кратеров может объяснить их относительную однородность.

Также сферические кратеры, обусловленные преимущественным травлением в определенных точках на поверхности кремния (100), могут быть вызваны механическим повреждением при шлифовании и полировании пластин и возникновением поверхностных дефектов. В таком случае травитель проникает в микроскопические трещины на поверхности кремния. Учитывая, что поверхность микротрещины представляет собой множественные открытые кристаллографические плоскости, некоторые из которых травятся быстрее, чем плоскость (100), дефекты поверхности представляют собой изотропный источник травления, что приводит к появлению и развитию кратеров на поверхности кремния.

Заключение

В настоящее время не существует единой теории, объясняющей формирование дефектов в виде кратеров на травленой поверхности кремния. К числу возможных механизмов, описывающих возникновение подобных дефектов, можно отнести наличие дислокационных областей в объеме кремния, вызванных, например, источником Франка — Рида или формированием октаэдрических пустот при выращивании слитка кремния. Также может иметь место нарушение поверхности кремниевых пластин при их шлифовке и полировке, что в дальнейшем приводит к формированию кратеров.

При изготовлении микромеханических кремниевых приборов существует необходимость понимания процессов и механизмов, приводящих к различным морфологическим особенностям протравленных поверхностей кремния для формирования структур с заданными параметрами. Это особенно важно при уменьшении размеров формируемых микромеханических структур и их приближении к шкале наноэлектромеханических систем (НЭМС). При производстве МЭМС необходимо точно контролировать параметры технологического процесса анизотропного травления кремния и предшествующих ему операций, например, шлифования и полировки пластин, а также качество исходных кремниевых пластин. Это позволит выявить возможные источники возникновения дефектов поверхности, скорректировать технологический процесс изготовления для минимизации нарушения морфологии травленой поверхности и повысить качество изготовления микромеханических структур.

Список литературы

1. Дмитриенко А. Г., Папко А. А., Торгашин С. И., Кириянина И. В. Об исследовании возможности создания инерциальных модулей на основе отечественных технологий объемной микромеханики // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 3 (5). С. 45–53.
2. Гридчин В. А., Зиновьев В. Б., Чебанов М. А. Микропрофилирование и оптимизация характеристик кремниевых сенсоров давления // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 7. С. 432–439.
3. Козлов Д. В., Смирнов И. П., Жуков А. А., Болотников Н. Н. Микромеханические компоненты микроробототехнических устройств космического назначения // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 3. С. 173–177.
4. Gosalvez M. A. and Nieminen R. M. Surface morphology during anisotropic wet chemical etching of crystalline silicon // New Journal of Physics. 2003. N. 5. P. 100.1–100.28.
5. Zubel I., Barycka I., Kotowska K., Kramkowska M. Silicon Anisotropic Etching in Alkaline Solutions IV: The Effect of Organic and Inorganic Agents on Silicon Anisotropic Etching Process // Sensors and Actuators A: Physical. 2001. Vol. 87. P. 163–171.
6. Sundaram K. B., Vijayakumar A., Subramanian G. Smooth Etching of Silicon Using TMAH and Isopropyl Alcohol for MEMS Applications // Microelectronic Engineering, 2005. Vol. 77.
7. Cheng Di, Gosalvez M. A., Hori T., Sato K., Shikida M. Improvements in Smoothness of Anisotropically Etched Silicon Surfaces: Effects of Surfactant and TMAH Concentrations // Sensors and Actuators A. 2006. Vol. 125. P. 415–421.
8. Рэйви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 475 с.
9. Келли А., Гровс Г. Кристаллография и дефекты в кристаллах. М.: Мир, 1974. 496 с.
10. ГОСТ 19658–81. Кремний монокристаллический в слитках. Технические условия.
11. Дубинский В. Н., Воробьев Р. А. Дефекты кристаллической решетки и прочность металлов и сплавов: учеб. пособие. Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2013. 88 с.
12. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972.

13. Благовещенский В. В., Панин И. Г. Построение динамической модели дислокационного источника Франка—Рида // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13, № 5. С. 5—10.
14. Van Veenendaal E., Sato K., Shikida M., Suchtelen J. van. Micromorphology of Single Crystalline Silicon Surfaces During Anisotropic Wet Chemical Etching in KOH and TMAH // Sensors and Actuators A: Physical. 2001. Vol. 93. P. 219—231.
15. Van Veenendaal E., Sato K., Shikida M., Nijdam A. J., Suchtelen J. van. Micromorphology of Single Crystalline Silicon Surfaces During Anisotropic Wet Chemical Etching in KOH: Velocity Source Forests // Sensors and Actuators A: Physical. 2001. Vol. 93. P. 232—242.
16. Hurle D. T. J., Rudolph P. A Brief History of Defect Formation, Segregation, Faceting, and Twinning in Melt-Grown Semiconductors // Journal of Crystal Growth. 2004. Vol. 264. P. 550—564.

S. I. Torgashin, Production Director, inercial@niifi.ru, **V. E. Pautkin**, Chief Specialist, inercial@niifi.ru, Joint-Stock Company "Research Institute for Physical Measurements", Penza, 440026, Russian Federation,

Corresponding author:

Torgashin Sergey I., Production Director, Joint-Stock Company "Research Institute for Physical Measurements", Penza, 440026, Russian Federation, e-mail: inercial@niifi.ru

Mechanism for Formation of Craters on the Surface of Silicon during Anisotropic Etching in a Solution of Potassium Hydroxide

Received on December 04, 2017

Accepted on December 28, 2017

The article presents the results of research of the defects of the etched silicon surface in the form of craters, which appear during a deep etching in a solution of potassium hydroxide in the process of formation of crystals of the micromechanical sensors. Possible mechanisms for formation of the craters are considered. The factors influencing the sources of the defects are determined, and variants minimizing the violation of the morphology of the silicon surface during deep etching are proposed.

Keywords: anisotropic etching, MEMS sensors, surface defects, etching craters, dislocations, elastic stresses

For citation:

Torgashin S. I., Pautkin V. E. Mechanism for Formation of Craters on the Surface of Silicon during Anisotropic Etching in a Solution of Potassium Hydroxide, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 323—329.

DOI: 10.17587/nmst.20.323-329

Introduction

Anisotropic chemical etching of silicon remains the most popular method of the volume microprocessing in the technology of the microelectromechanical systems (MEMS). In combination with the other processes of the technology of the integrated microcircuits (IC), such as thermal oxidation, sedimentation of layers, diffusion of impurities, etc., it has a wide range of applications in manufacturing of MEMS sensors of pressure, acceleration, angular speeds, etc. [1—3]. A widely used alkaline etchant is the water solution of potassium hydroxide (KOH) of various concentrations, which became popular due to its following properties: availability, nontoxicity, simplicity of the applied equipment and industrial equipment, and formation of smooth surfaces without a physical influence on a processed material.

The quality of the etched silicon surface plays a more and more important role, because the dimensions of the MEMS elements constantly decrease. MEMS demand formation of very smooth surfaces and accurate observance of the modes of the manufacturing processes. For example, the surface roughness should be very low in comparison with the size of a micromechanical object. This demands a simultaneous taking into account of many factors: from cleanliness of an etchant up to orientation of a silicon plate, and, which is especially important, presence of defects on its surface after etching. Hence, understanding of the processes of formation of the defects on a silicon surface is an important problem in manufacturing of the micromechanical devices. Knowledge of the defect production mechanisms allows us to control the technological processes and the quality of the obtained silicon microstructures.

In this connection the questions of formation of the silicon structures with high-quality defect-free etched surfaces are of great importance for the manufacturing technologies of the micromechanical

devices. Solving of the given problem will promote obtaining of the reliable micromechanical devices with improved metrological and operational characteristics.

The given article presents the results of the practical works concerning the deep etching of the silicon during formation of crystals of the micromechanical sensors, considers the visible defects of the etched silicon surface, and also gives an analysis of the possible mechanisms for formation of the defects.

Experimental part

Micromechanical sensors, such as accelerometers, contain a silicon sensitive element. A silicon crystal of a sensitive element is made on the silicon plates of orientation (100) by the method of anisotropic etching of the silicon in a KOH solution, at that, the walls of the formed silicon microstructures are (100) and (111) crystallographic planes.

The silicon plates of bilateral polishing, of EKES-0.01 brand, with thickness of $400 \pm 20 \mu\text{m}$ serving for formation of the structures of micromechanical sensors, were chemically processed in order to remove the organic and inorganic pollutions. After that the plates were oxidized by a thermal method. On the generated layer of the silicon dioxide a photolithography was done for creation of the topology of the formed microstructures. Then the silicon plates were placed in a KOH solution within the temperature range of 95...98 °C. The etching was done to the depth from 100 up to 150 μm .

After the etching operation on the surfaces (100) and (111) of the formed structures, the defects in the form of craters were observed. The given defects were observed easily in MSSO three-dimensional microscope in the falling light at $\times 16$ magnification. It was revealed, that their distribution on the area of a silicon plate had an accidental character.

Surface (100)

Silicon surfaces of orientation (100) contained craters (fig. 1, see the 2nd side of cover). The craters were distributed on the surface in a random way, their diameter was tens — hundreds of micrometers, and their depth — from hundreds of nanometers up to a micron.

The geometrical sizes of the craters were measured. Their width was 0.05...0.1 mm at the depth of 0.01...0.650 μm. Fig. 2 presents examples of measurement of the profile of the etched surface of silicon (100) containing craters of the above-mentioned dimensions. The profilograms were made by Mitaka 60PF profilometer on the length of estimation of 1.0 mm.

As is known, certain defects of morphology appear during the anisotropic etching of silicon. They are either pyramidal protuberances [4—7], or shallow rounded pits-craters. Such defects are due to various production factors and, as a rule, do not appear, simultaneously. In both cases the density of the surface defects (either protuberances or pits) increases with a decrease of the concentration of the etchant.

The mechanism for formation of the protuberances is usually connected with the local micromasking of the silicon by means of the fixed gas bubbles (as a rule, hydrogen generated during the chemical reaction of etching) or other particles, which lead to formation of small pyramidal or cone-shaped ledges on the etched surface [7]. Unlike the given defects, the defects of the crater type are smooth, with elliptic profiles extending deep into the etched surfaces. The craters can be created by the surface damages, which result from the initial preparation of the surface.

There are two hypotheses connected with occurrence of the craters. The first hypothesis is based on assumption that the specified craters are formed in the places of crossing of the dislocation loops of planes {111}/<110> with the etched surface (100). As is known, the plane (111) is etched slower, than the other planes, because the surface atoms on this plane have three basic bonds, which have to be broken off, unlike on the plane (100), the atoms which have only two basic bonds. Around the dislocation nuclei there is a field of elastic stresses, which can lead to easing of the basic bonds of the atoms of the crystal lattice around the dislocation nuclei and to a better dissolution of the silicon around the dislocations [8]. The elastic stress of the dislocation increases with the reduction of the distance to a nucleus of a dislocation. Thus, according to [9], for a dislocation in the anisotropic environment the elastic energy per a unit of length equals to

$$E = (K'b/4\pi)\ln(R/r_0),$$

where parameter K' depends on the constants of elasticity of a material; b — full displacement of a dislocation; r_0 — radius of the nucleus of a dislocation; R — radius from the nucleus of a dislocation.

As a result, the following force influences a dislocation:

$$F_x = -\frac{dE}{dx},$$

where E — energy determined by the presence of a dislocation.

The gradient of the elastic stress contributes to the fact that the atoms located closer to a nucleus of a dislocation, will be removed faster, than the ones located further from the nucleus.

This leads to occurrence of craters of the elliptic form around the dislocation nuclei on the etched surface. The silicon grown by the method of Chokhralsky can have some hundreds of dislocations per a square centimeter because of the growth processes [10]. These dislocations can explain occurrence of pits of etching on the surface of the silicon (100).

In order to prove the fact that the observable craters are incurved structures, an additional etching of the silicon was done till a possible occurrence of microapertures in the places of the craters. At that, it was assumed, that the areas of the dislocations were located randomly on all the volume of the silicon. Thus, the craters located originally on the surface are etched, at that, in the process of etching new craters can appear at the depth. The results of the additional etching of the silicon samples are presented in fig. 3 (see the 2nd side of cover). They demonstrate formation of the microapertures in the locations of the craters.

Thickness of the silicon, surrounding the microapertures, was equal to 1.1...1.5 μm, which correlated with the data of the received profilograms by the depth of the craters, with account of the bilateral character of etching of the silicon structures.

It is assumed, that separate craters can appear in the places, where the lines of the dislocations cross the etched surface at a non-parallel angle. Mainly big craters can be generated by a big field of the elastic stresses caused by a congestion of a multitude of dislocations. Linear arrays of the craters can be formed by the dislocation line, passing in parallel to the etched surface or the linear array of the dislocation lines, normal to the surface. Occurrence of such dislocations is connected to the Frank—Read source [11].

Surface (111)

Research of etchings of the surface of silicon (111) (fig. 4) testifies positively to the assumption of occurrence of the dislocations according to the Frank—Read source. It is obvious, that the image is identical to the one presented in fig. 5 and described in [12, 13].

The hypothesis of formation of the craters due to dislocations is considered in [14, 15]. According to the given hypothesis the craters should have big cone-shaped forms during etching of the nuclei of the dislocations. It is considered that the cone forms should continue deep into a material during etching, and, as a result, the small cones should become deeper. In practice the craters do not become deeper, their depth remains constant and equals to hundreds of nanometers — units of micrometers.

The alternative hypothesis explaining occurrence of the craters is based on the assumption that etching proceeds isotropically within the craters because of the presence of an atomic vacancy in the crystal lattice of the silicon and inclusion of microvoids in the silicon volume during the ingot growth. As is known, in the silicon, grown by the method of Chokhralsky, in case of a fast growth of an ingot, the defects in the form of vacancies can accumulate and form the accidentally distributed octahedral voids inside the volume silicon [16]. Accumulation of the atomic vacancies can lead to a local destruction of the crystal structure, which allows us to etch silicon isotropically in all the directions around the dislocation nuclei. If the growing ingot is drawn from a melt too quickly, the defects are cooled slowly, which prevents kinetically their recombination with the atoms in the interstitial space and leads to their accumulation and to occurrence of the octahedral voids reaching about 100 nm. These defects remain in the silicon after the ingot processing, their random distribution coincides with the random distribution of the craters, and the even dimensions of the craters can explain their relative uniformity.

Also, the spherical craters, determined by the primary etching in certain points on the surface of the silicon (100), can be caused by a mechanical damage during grinding and polishing of the plates and occurrence of the surface defects. In that case the etchant penetrates into the microscopic cracks on the silicon surface. Considering the fact that the surface of a microcrack represents multiple open crystallographic planes, some of which are etched faster than the plane (100), the defects of the surface represent an isotropic source of etching, which leads to occurrence and development of craters on the silicon surface.

Conclusion

There is no single theory explaining formation of the defects in the form of craters on the etched surface of the silicon. Among the possible mechanisms describing occurrence of such defects we can name the presence of the dislocation areas in the volume of the silicon, caused, for example, by the Frank—Read source or formation of the octahedral voids during the growth of a silicon ingot. Also, there can be a damage of the surface of the silicon plates during their grinding and polishing, which subsequently leads to formation of the craters.

Manufacturing of the micromechanical silicon devices demands an understanding of the processes and mechanisms leading to the morphological features of the etched silicon surfaces for formation of the structures with the set parameters. This is important for reduction of the dimensions of the formed micromechanical structures and their approximation to the scale of the nanoelectromechanical systems (NEMS). During manufacture of MEMS it is necessary to control the parameters of the process of the anisotropic

etching of the silicon and the preceding operations, for example, grinding and polishing of plates, and also the quality of the initial silicon plates. This will allow us to reveal the possible sources of occurrence of the surface defects, correct the technological process of manufacturing for minimization of the damage to the morphology of the etched surface, and improve the quality of manufacturing of the micromechanical structures.

References

1. Dmitrienko A. G., Papko A. A., Torgashin S. I., Kiryanina I. V. *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol*, 2013, no. 3 (5), pp. 45–53 (in Russian).
2. Gridchin V. A., Zinoviev V. B., Chebanov M. A. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 7, pp. 432–439 (in Russian).
3. Kozlov D. V., Smirnov I. P., Zhukov A. A., Bolotnik N. N. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 173–177 (in Russian).
4. Gosalvez M. A. and Nieminen R. M. Surface morphology during anisotropic wet chemical etching of crystalline silicon, *New Journal of Physics*, 2003, no. 5, pp. 100.1–100.28.
5. Zubel I., Barycka I., Kotowska K., Kramkowska M. Silicon Anisotropic Etching in Alkaline Solutions IV: The Effect of Organic and Inorganic Agents on Silicon Anisotropic Etching Process, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, vol. 87, pp. 163–171.
6. Sundaram K. B., Vijayakumar A., Subramanian G. Smooth Etching of Silicon Using TMAH and Isopropyl Alcohol for MEMS Applications, *Microelectronic Engineering*, 2005, vol. 77.
7. Cheng D., Gosalvez M. A., Hori T., Sato K., Shikida M. Improvements in Smoothness of Anisotropically Etched Silicon Surfaces: Effects of Surfactant and TMAH Concentrations, *Sensors and Actuators A*, 2006, vol. 125, pp. 415–421.
8. Ravi K. *Defekty i primesi v poluprovodnikovom kremnii* (Defects and impurities in semiconductor silicon), Moscow, Mir, 1984, 475 p. (in Russian).
9. Kelli A., Groves G. *Kristallografiya i defekty v kristallakh* (Crytallography and defects in crystals), Moscow, Mir, 1974, 496 p. (in Russian).
10. Kremniy monokristallichесkiy v slitkakh. *Tekhnicheskiye usloviya*, GOST 19658–81 (Single-crystal silicon in ingots. Technical conditions), Moscow, Standart, 2001, 64 p. (in Russian).
11. Dubinsky V. N., Vorobiev R. A. *Defekty kristallichесkoy reshetki i prochnost metallov i splavov: ucheb. posobiye* (Defects of the crystal lattice and strength of metals and alloys: Proc. allowance), Nizhny Novgorod, NSTU them. R. E. Alekseeva, 2013, 88 p. (in Russian).
12. Hirt J., Lote I. *Teoriya dislokatsiy* (Theory of dislocations), Moscow, Atomizdat, 1972, 599 p. (in Russian).
13. Blagoveshchensky V. V., Panin I. G. *Vychislitel'nyye tekhnologii*, 2008, vol. 13, no. 5, pp. 5–10. (in Russian).
14. Van Veenendaal E., Sato K., Shikida M., van Suchtelen J. Micromorphology of Single Crystalline Silicon Surfaces During Anisotropic Wet Chemical Etching in KOH and TMAH, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, vol. 93, pp. 219–231.
15. Van Veenendaal E., Sato K., Shikida M., Nijdam A. J., van Suchtelen J. Micromorphology of Single Crystalline Silicon Surfaces During Anisotropic Wet Chemical Etching in KOH: Velocity Source Forests, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, vol. 93, pp. 232–242.
16. Hurle D. T. J., Rudolph P. A Brief History of Defect Formation, Segregation, Faceting, and Twinning in Melt-Grown Semiconductors, *Journal of Crystal Growth*, 2004, vol. 264, pp. 550–564.

УДК 661.571.1+539.23+621.3.049.771+681.586

DOI: 10.17587/nmst.20.329-339

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

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ. ЧАСТЬ 2. ТЕРМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В РЕАКТОРАХ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Поступила в редакцию 12.01.2018

В части 2 обзора рассмотрены состояние и направления развития технологий получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектронных и микросистемных приложений при термической активации исходных реагентов в реакторах циклического действия с последовательно-импульсным напуском исходных реагентов. Рассмотрены результаты исследований возможностей реализации режима атомно-слоевого осаждения (ACO) при 300...650 °C и использовании промышленных реагентов $SiCl_4$, SiH_2Cl_2 , а также олигомеров (Si_2Cl_6 , Si_3Cl_8). Выделены работы, в которых режим ACO наиболее вероятен; в остальных работах рост пленок протекает по механизмам химического осаждения с участием поверхности подложки. При температуре менее 500 °C пленки нестехиометричны и обогащены кремнием, содержат много кислорода, а также примеси водорода и хлора. Достигнутая конформность пленок на структурах с аспектным отношением 60 составила <80 %.

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

Введение

В работе [1] было проанализировано состояние технологий получения тонких пленок (ТП) нитрида кремния (ТПНК) для применения в технологиях интегральных микросхем (ИМС) иnano-

микроэлектромеханических систем (далее МЭМС). Были рассмотрены: а) состояние промышленных процессов химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ или CVD), близких по составу к стехиометрическим Si_3N_4 с соотношением $Si : N = 1 : 1,33$ и

значением показателя преломления $n = 2,02 \pm 0,02$ высокотемпературных ТПНК (далее С-ТПНК), в реакторах низкого давления (РНД) проточного типа с термической активацией химических реакций аммонолиза исходных кремнийсодержащих реагентов (SiH_4 , SiCl_4 и SiH_2Cl_2); б) направления развития термически активированных процессов ХОГФ С-ТПНК; в) результаты поиска новых исходных реагентов, условий процессов, новых конструкций реакторов для ХОГФ.

Для развивающихся интегральных технологий необходимы новые методы получения ТП, в частности, позволяющие решить задачу получения конформных ТП в современных приборах с большими аспектными отношениями. Применительно к простейшему случаю рельефа в виде углубления прямоугольной формы с вертикальными стенками на плоской поверхности рельефа аспектное отношение — это отношение высоты углубления к его ширине. Под конформностью осаждения в наиболее общем случае понимается выраженное в процентах отношение толщины пленки на боковой стенке в нижней части углубления рельефа к толщине пленки на верхней плоской поверхности возле углубления. Методология и характеризация конформности для процессов ХОГФ ТП рассмотрены автором в работах [3, 4], взаимосвязь конформности роста и кинетических характеристик процессов ХОГФ систематизирована в работе [5]. В частности, показано, что при получении ТП активированными методами, например, при плазмохимическом осаждении (ПХО), невозможно достичь удовлетворительной конформности роста ТП в высокоаспектных структурах. Более подробно этот случай был рассмотрен в работе [6].

Для решения задач создания конформных покрытий на высокоаспектных структурах современных ИМС и МЭМС оказался перспективен вариант циклического построения процессов, при котором реагенты подаются в обычные реакторы для ХОГФ последовательными дозированными импульсами. Такие циклические процессы, например, называют в общем случае "импульсными ХОГФ" ("pulsed-CVD"). Одним из вариантов такого процесса является метод так называемого атомно-слоевого осаждения (АСО), в зарубежной литературе — Atomic Layer Deposition, ALD [7], основанный на реализации в ряде случаев эффекта самонасыщающейся или самоограничивающейся адсорбции (self-limiting adsorption) одного из реагентов на поверхности подложки с последующей его реакцией с подаваемым в реактор вторым реагентом. Технически это обеспечивается разделением импульсов реагентов импульсами инертного газа или вакуумной откачки для полного удаления остатков одного реагента перед напуском другого, что полностью исключает вероятность протекания химических про-

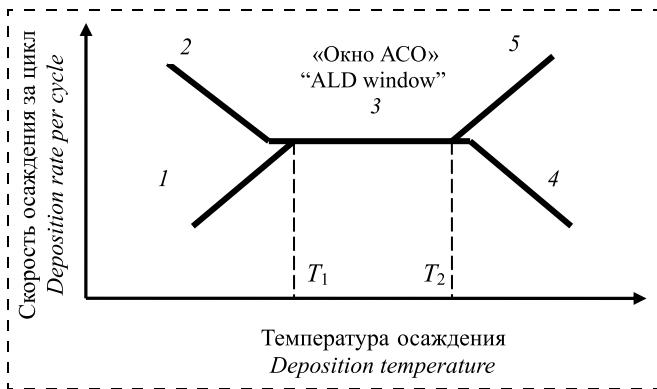
цессов в газовой фазе. Если эффект самонасыщающейся адсорбции реализуется, то процесс АСО осуществляется строго на поверхности подложки и процессы диффузии не являются лимитирующими. Таким образом, создаются условия для роста значительно более конформных покрытий на высокоаспектных структурах.

В последние годы метод АСО рассматривается и для нанесения ТПНК, в основном по двум направлениям: при относительно высоких (однако ниже, чем при традиционных методах ХОГФ) температурах с термической активацией реагентов, и при низких температурах, как правило, с плазменной активацией азотсодержащего реагента. При низкотемпературном АСО с активацией неудовлетворительна конформность роста на высокоаспектных структурах [6, 8, 9], а состав пленок не является стехиометрическим. В работе [1] подобные пленки были охарактеризованы как "кремний-азот-водородсодержащие тонкие пленки (КАВ-ТП)". Такие пленки представляют самостоятельный интерес и мы их не рассматриваем в настоящем обзоре.

Целью части 2 обзора публикаций двух последних десятилетий является анализ состояния и направлений развития технологий получения ТПНК в реакторах циклического действия при термической активации химических реакций. По состоянию на конец 2017 г. обобщающих работ по этой тематике нет.

Общая характеристика циклических термоактивированных процессов ХОГФ

Для реализации АСО на эффекте самонасыщающейся адсорбции одного из исходных реагентов этот "первый" реагент (также называемый "предшественник", "прекурсор") подается в реактор дозированным импульсом с концентрацией молекул, достаточной для реализации самонасыщающейся адсорбции реагента без его термоактивированного разложения на поверхности. Далее остатки первого реагента удаляют импульсом инертного газа или вакуумной откачкой и выполняют дозированный импульсный напуск "второго" реагента с концентрацией, достаточной для реализации химической реакции. Молекулы второго реагента взаимодействуют с адсорбированными на поверхности подложки молекулами первого реагента напрямую, без образования промежуточных продуктов, формируя в идеальном случае один монослой конечного продукта за один цикл осаждения. После удаления избытка второго реагента и побочных продуктов химической реакции цикл процесса завершается. Таким образом, формирование продукта химической реакции напрямую принципиально отличает АСО от ХОГФ в проточных реакторах, где при одновременном напуске исходных реагентов проис-



Схематичное определение "Окна АСО" [10]: 1 — область лимитирования низкой скорости осаждения; 2 — область лимитирования конденсацией; 3 — область "Окно АСО"; 4 — область лимитирования десорбцией; 5 — область лимитирования реакцией термораспада прекурсора

Schematic diagram of CVD with "ALD window" [10]: 1 — low deposition rate area; 2 — condensation area; 3 — "ALD window"; 4 — desorption area; 5 — thermal decomposition area

ходит образование промежуточных продуктов реакции исходных реагентов.

Послойное наращивание при АСО может реализоваться при определенных условиях. На рисунке схематично приведены варианты температурных зависимостей роста пленок при ХОГФ [10]. Режим роста АСО (в случае его реализации) локализуется в довольно узком диапазоне постоянной температуры ($\Delta T = T_2 - T_1$), именуемом "Окно АСО" ("ALD window"), обозначенном 3 на рисунке. Этому режиму могут предшествовать области лимитирования процесса роста пленки 1 низкой реакционной способностью и конденсацией 2. После "Окна АСО" могут реализовываться области лимитирования процесса роста десорбцией исходного прекурсора 4 или реакцией термораспада прекурсора по обычному механизму реакций ХОГФ с участием процессов в газовой фазе 5. Для обычных процессов ХОГФ типичны области 1 и 5. Появление "Окна АСО" возможно в том случае, когда в процесс ХОГФ оказывается активно включенной поверхность подложки, на которой могут иметь место гетерогенные реакции формирования ТП [5]. Отметим, что "Окно АСО" располагается в области минимальных температур для процессов ХОГФ, а скорости роста ТП при ХОГФ многократно превышают таковые при АСО за один цикл процесса, которые не превышают толщину монослоя. Отметим также, что рассмотренный выше случай самоограничивающейся адсорбции является идеализированным, поскольку в ряде случаев возможен термораспад адсорбированного реагента и тогда рост ТП происходит по гетерогенным механизмам ХОГФ.

Таким образом, при осаждении конкретных ТП целью исследований является обнаружение и количественная характеризация "Окна АСО". При этом циклическая организация процесса с после-

довательно-импульсным напуском реагентов является обязательной для реализации эффекта самонасыщающейся адсорбции.

Направления технологий получения ТПНК в реакторах циклического действия

К сожалению, в большей части источников информации под термином "метод АСО" ошибочно подразумеваются все циклически организованные процессы осаждения ТП, в том числе таковыми не являющиеся. Развитие циклических процессов получения ТПНК (так же, как и для процессов ХОГФ в проточных реакторах [1]) идет по двум направлениям.

Направление 1 включает исследование возможностей реализации метода АСО при термической активации реагентов при пониженной температуре относительно промышленных процессов ХОГФ С-ТПНК [1]. В этом случае интересным является как возможность использования традиционных промышленных реагентов, так и новых реагентов. Именно это направление представляет большой интерес для перспективных разработок ИМС и МЭМС с высокоаспектными структурами.

Направление 2 включает низкотемпературные методы получения ТП с применением, как правило, различных вариантов дополнительной плазменной активации азотсодержащих реагентов. Развитие этого направления обусловливается новыми, в основном низкотемпературными, направлениями применения ТП. В ходе работы автора над настоящим обзором появилась значительная по объему публикация [9], авторы которой предприняли попытку охвата большого массива данных по преимущественно плазмоактивированным КАВ-ТП. В работе рассмотрены пленки, полученные в традиционных плазменных реакторах, в плазме высокой плотности, а также методы АСО с плазменной активацией. Здесь также необходимо подчеркнуть, что несмотря на многочисленные утверждения о том, что плазменные методы получения ТП позволяют решать задачи получения конформных покрытий, на сегодняшний день убедительных экспериментальных подтверждений этому пока нет [6]. Более того, выводы автора, сделанные ранее в публикациях [3—5], прямо обосновывали потенциальную невозможность получения конформных покрытий методами с активацией газовой фазы при ХОГФ, куда можно отнести и метод плазмоактивированного АСО. В связи с тем что низкотемпературные плазмоактивированные методы получения ТП имеют специализированную аппаратурную реализацию, процессы осаждения не являются строго химическими процессами и для них неизвестны брутто-реакции процессов, нет обобщающих представлений о схемах и механизмах процессов, а КАВ-ТП имеют массу ограничений по

применимости ввиду потенциальной неконформности, результаты исследований по направлению 2 в данном обзоре не рассматриваются.

Анализ вариантов реализации направления 1

Использование традиционных промышленных реагентов. Промышленные процессы получения С-ТПНК для ИМС и МЭМС реализованы в проточных РНД по реакциям аммонолиза SiH_4 , SiCl_4 и SiH_2Cl_2 (основной реагент) [1]. Ввиду термического распада SiH_4 при температурах выше 520 °C [11], исследования возможности реализации режима АСО проводили только для SiCl_4 и SiH_2Cl_2 [12–16].

Авторы работы [12] проводили исследования при 427...627 °C в высоковакуумной индивидуальной камере при разных температурах (T_d) и давлениях (P_d). Подложку Si (100) промывали метанолом, ацетоном и деионизированной водой, затем продували очищенным воздухом от микрочастиц, прогревали в реакторе при 602 °C в течение 1 мин, после чего подвергали воздействию плазмы H_2O для удаления углерода, что в итоге позволяло получить SiO_2 толщиной около 2 нм с гидроксилированной поверхностью (SiOH^*). Далее при желаемой температуре подложки проводили напуск SiCl_4 с дозой $\geq 2 \cdot 10^9 \text{ L}$ (L — единица измерения

Лэнгмюр = 10^{-6} мм рт. ст. · с, произведение давления P_d на длительность импульса реагента t), реакция которого с поверхностью описана схемой: $\text{SiOH}^* + \text{SiCl}_4 \rightarrow \text{SiOSiCl}_3^* + \text{HCl}$ (поверхностные группы здесь и ниже обозначены звездочками). В ходе последующего напуска аммиака с дозой $\geq 1,8 \cdot 10^{10} \text{ L}$ предположена реакция $\text{SiOSiCl}_3^* + \text{NH}_3 \rightarrow \text{SiOSiH}_2^* + \text{HCl}$. После нескольких последовательных циклов напуска SiCl_4 и NH_3 поверхность трансформировалась от SiO_2 к Si_3N_4 (соответствующих схем не приведено). Это, по мнению авторов, позволяло проводить исследования роста на *in-situ* сформированной ТПНК. Для объяснения схем процесса авторы предположили протекание при соответствующих импульсах SiCl_4 и NH_3 двух реакций: $\text{SiNH}^* + \text{SiCl}_4 \rightarrow \text{SiNSiSl}_3^* + \text{HCl}$ и $\text{SiCl}^* + \text{NH}_3 \rightarrow \text{SiNH}_2^* + \text{HCl}$. При указанных в приведенной здесь таблице параметрах ТПНК формировались без нуклеационной задержки по линейной зависимости от числа циклов осаждения с постоянной скоростью W , с показателем преломления $n = 2,01 \pm 0,05$ и с очень малой шероховатостью, равной 0,3 нм. Снижение W при меньших температурах вдвое авторы объяснили снижением реакционной способности поверхности. Возможно это соответствует переходу от области 1 к области 3 на рисунке, приведенном выше.

Результаты исследований роста ТПНК в циклических процессах
Results of the research of SNTF growth in the cyclic processes

Литература Ref. No	Реагенты Reactants	T_d , °C	P_d , Па P_d , Па	t , с t , с	W , нм/цикл W , nm/cycle	Si:N
[12]	$\text{SiCl}_4, \text{NH}_3$	427...627	13...133	—	0,245	1:1,35
[13]	SiCl_4	375	25 500	30...180	0,19 (на Si) (on Si)	1:0,8
	NH_3	550	66 500	120		
[14–19]	SiCl_4	375	22 600	305	—	—
	NH_3	550	39 900	90		
[20]	SiCl_4	350...400	23 000	—	0,055	—
	NH_3		44 000	—		
[21]	$\text{SiCl}_4, \text{NH}_3$	500	—	—	0,13	1:1
	$\text{SiH}_2\text{Cl}_2, \text{NH}_3$				0,12	
[22]	$\text{SiH}_2\text{Cl}_2, \text{NH}_3$	450	—	—	0,05	—
[23]	SiH_2Cl_2	200...400	8	90	0,09	1:1
	NH_3		24	15		
[24]	SiH_2Cl_2	375	8	90	0,1	1:1
	NH_3		24	20		
[25]	Si_2Cl_6	52...650	133	15	0,23	1:1,39
	N_2H_4		13,3	720		
[26]	$\text{Si}_2\text{Cl}_6, \text{NH}_3$	443...493	133...1330	—	0,23	1:1
[27]	$\text{Si}_3\text{H}_8, \text{N}_2, \text{NH}_3$	410...450	—	—	—	
[28]	Si_3Cl_8	310...500	93	2...15	0,027	1:1,3
	NH_3			1...30		

Исследования работы [13] проведены в экспериментальном реакторе малого размера. Данных о подготовке поверхности подложки нет. Особенностью исследования являются использование разных T_d при напуске SiCl_4 и NH_3 и промежуточного высокотемпературного отжига ($900\ldots1050^\circ\text{C}$) между напусками реагентов. Отжиг обнаружил селективность скорости осаждения на поверхностях Si и SiO_2 : отношение составляло 2 : 1 при 900°C и 20 : 1 при 1050°C . Эффект отжига объяснен реакцией SiO_2^* и адсорбированного атома Si^* по схеме $\text{SiO}_2^* + \text{Si}^* \rightarrow 2 \text{SiO}$ (летучий продукт). Пленки нестехиометричны, концентрация кислорода (далее $[\text{O}]$, ат. %) составляла около 20 %, источником кислорода посчитали остаточные газы или примеси в исходных реагентах. Развитием [13] является серия публикаций [14—19], авторы которых исследовали транзисторные структуры с ТПНК на легированных бором подложках Si (001) с сопротивлением 15 [15, 17] и 10 [14, 16] $\text{Ом}\cdot\text{см}$. По совокупности кратких данных из этих публикаций по процессу осаждения отметим следующее: а) сведений об использованном оборудовании не приведено; б) обработку поверхности проводили в растворе $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ с пропорцией 0,15 : 3 : 7 при 80°C в течение 10 мин с последующим насыщением (так называемой терминацией, *termination*) поверхности водородом в растворе разбавленной до 0,5 % HF (далее DHF) для предотвращения образования естественного оксида; в) напуск реагентов проводили с указанными в таблице параметрами; г) толщины пленок составляли около 0,4 нм [14, 18], 3,5 нм (20 циклов) [15] и 4,5 нм (30 циклов) [19]; д) после процесса пленки отжигали в NH_3 при $550\ldots600^\circ\text{C}$ в течение 1,5 ч.

Рост ТП на подложках Ge (100) [20], предварительно обработанных в DHF и отожженных в NH_3 при 500°C в течение 10 мин непосредственно перед процессом осаждения, обнаружил очень низкую скорость наращивания (таблица).

Сравнение эффективности реагентов SiCl_4 и SiH_2Cl_2 с использованием NH_3 выполнено в работе [21] в объемных реакторах (см. рисунок *a*, в работе [1]) на легированных бором подложках Si (100), предварительно обработанных BOE (Buffered Oxide Etchant — раствор буферированной фтористоводородной кислоты). Скорости осаждения нестехиометрических ТП линейно, без насыщения, зависели от доз реагентов в интервалах $(0,2\ldots5,8)\cdot10^{10} \text{ L}$ и $(0,8\ldots3,2)\cdot10^9 \text{ L}$ для пар $\text{SiCl}_4\text{—NH}_3$ и $\text{SiH}_2\text{Cl}_2\text{—NH}_3$, соответственно, достигая значений, указанных в таблице. Повышенные скорости растворения полученных из $\text{SiH}_2\text{Cl}_2\text{—NH}_3$ тонких пленок связывали с повышенной концентрацией в них водорода ($[\text{H}]$, ат. %) ввиду его наличия в SiH_2Cl_2 . В работе [22] те же авторы изучали систему $\text{SiH}_2\text{Cl}_2\text{—NH}_3$ и более подробно рассмотрели состав и свойства ТП

в диапазоне $450\ldots550^\circ\text{C}$. Выход скорости осаждения на насыщение со значением около 0,08 нм/цикл имел место только при 450°C при дозах реагентов $(0,6\ldots6)\cdot10^{10} \text{ L}$. Однако такие ТП оказались в 40 раз более быстрорасторимыми в DHF относительно С-ТПНК сравнения и нестабильны во времени. В течение двух суток экспозиции на открытом воздухе наблюдалось возрастание толщины пленки на 20 % и снижение значения n от 2,3 до 1,8. Пленки, выращенные при более высоких температурах, оказались и более стабильными, и более стойкими к растворам DHF. Однако при $T_d > 450^\circ\text{C}$ при всех исследованных дозах реагентов (от $0,3\cdot10^{10} \text{ L}$ до $6\cdot10^{10} \text{ L}$) не обнаруживалось насыщение, свидетельствующее в пользу режима АСО, а значение W достигали 0,4...0,45 нм/цикл, существенно превышая монослои.

В заключение упомянем первые по времени часто цитируемые работы [23, 24], хотя в них представлены не строго термоактивированное получение ТП из дихлорсилана. В работе [23] использовали систему $\text{SiH}_2\text{Cl}_2\text{—NH}_3$ при температуре $200\ldots550^\circ\text{C}$, однако аммиак, подаваемый в реактор импульсом в качестве первого реагента, подвергался предварительному удаленному плазмоактивированному разложению при частоте 2,45 ГГц и мощности плазмы 30...60 Вт. Перед осаждением легированные бором подложки Si (100) сопротивлением 10 $\text{Ом}\cdot\text{см}$ сначала обрабатывали в растворе $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH} = 100:20:1$ с последующим погружением в DHF и промывкой в деионизованной воде в течение 1 мин. Такая обработка позволяла полностью терминировать поверхность водородом. Некоторые параметры процессов приведены в таблице. Длительность экспозиции в дихлорсилане составляла 45...450 с, оптимальная — 90 с. Выход реакции на насыщение со скоростью около 0,09 нм/цикл имел место в большинстве экспериментально проверенных условий в интервале температур $200\ldots400^\circ\text{C}$. При больших температурах скорость осаждения начинала резко возрастать. Нестехиометрические ТП имели $n = 1,6\ldots1,7$; $[\text{O}] \approx 7\%$ (объяснено возможным распылением кварцевых стенок генератора плазмы), $[\text{H}] \approx 13\%$; хлор ([Cl] ат. %) $\approx 0,5\%$.

Авторы работы [24] исследовали осаждение ТПНК при 375°C с использованием принудительной активации на нагретой до 1700°C вольфрамовой ленте импульсно подаваемого аммиака (метод, называемый Catalytic CVD, Cat-CVD или Hot-Wire CVD, HWCVD). При этом импульс частично диссоциированного аммиака был первым. Подложки легированного бором Si (100) обрабатывали в DHF для терминирования поверхности водородом; для сравнения использовали С-ТПНК, выращенные при ХОГФ. Основные результаты приведены выше в таблице. Насыщение скорости роста наблю-

далось при импульсах дихлорсилана более 90 с и диссоциированного аммиака — более 20 с. Авторы обнаружили радикально отличный рост пленок на подложках кремния (линейный рост от числа циклов) и нитрида кремния, на котором имел место длительный (~30 циклов) инкубационный период (нуклеационная задержка), объясненный недостатком на поверхности С-ТПНК групп Si—H_x, имеющихся на терминированной поверхности кремния. Концентрации кислорода и хлора в пленке составляли около 2 ат. %. Показатель преломления был около 1,85; скорость растворения в растворах HF приближалась к таковой для С-ТПНК.

Новые реагенты для получения пленок ТПНК.

Новыми веществами для получения нитрида кремния стали олигомеры Si₂Cl₆ [25, 26], Si₃H₈ [27] и Si₃Cl₈ [28].

Авторы работы [25] исследовали рост ТП в экспериментальном реакторе с участием Si₂Cl₆ и гидразина N₂H₄ при температуре 427...700 °C (оптимальная — 600 °C). Для терминирования поверхности сначала подавался гидразин. По мнению авторов, реализация режима АСО (насыщение по обоим реагентам) имела место при $P_d < 133$ Па. При $P_d > 133$ Па скорость осаждения возрастала вдвое и более, что объяснено реакцией в газовой фазе остатков реагентов. В ТПНК, по составу близких к стехиометрическим, обнаружены [O] = 4 % (объяснен присутствием в гидразине чистотой 98 % следов воды), [H] < 1 %, [Cl] — ниже предела обнаружения.

Авторы работы [26] исследовали систему Si₂Cl₆—NH₃ в реакторе с холодными стенками при температуре процесса 515...573 °C и дозах реагентов (0,1...3) · 10⁸ L для Si₂Cl₆ и (1...10) · 10⁸ L для NH₃ (см. таблицу). Обнаружено, что реальная температура подложки T_d , измеренная калиброванными термопарами, при импульсном напуске реагентов существенно меньше, чем задаваемая "температура процесса": 453, 496 и 513 °C против 515, 557 и 573 °C, соответственно. Использовали легированные бором подложки Si (100), обработанные в ВОЕ с последующей промывкой в деионизованной воде. Насыщение скорости осаждения имело место при дозах > 1 · 10⁸ L для обоих реагентов. При $T_d > 513$ °C скорость осаждения резко возрасала, соответствуя переходу от области 3 к области 5 (см. рисунок). По мнению авторов, при $T_d > 500$ °C осаждение ТП идет двумя путями: АСО и азотированием кремниевой ТП — продукта термораспада Si₂Cl₆ (его начало оценено в 500 °C). Нестехиометрические пленки имели $n = 1,7 \dots 1,8$, [O] = ~8 % (результат окисления воздухом после процесса), [Cl] — ниже предела обнаружения.

В работе [27] применительно к промышленному объемному реактору низкого давления с горячими стенками (см. рисунок *a* в работе [1]) рассмотрен

пример синтеза пленок при низкой температуре и циклической организации процесса с использованием Si₃H₈. Процесс $W < 0,01$ нм/цикл не является АСО как таковым и осуществлялся путем термораспада Si₃H₈ с последующей конверсией образовавшегося аморфного кремния в нитрид кремния с помощью нескольких вариантов активирования плазмой азотсодержащих реагентов. Показатели преломления для обогащенных по кремнию пленок составляли: для N₂ $n = 2,1$, для N₂ + NH₃ (низкой концентрации) $n = 2,18$, для N₂ + NH₃ (высокой концентрации) $n = 2,77$.

Авторы работы [28] исследовали систему Si₃Cl₈—NH₃ (см. условия в таблице) на подложках со структурами с аспектным отношением, равным 60, и естественным оксидом кремния без обработок. В интервале исследованных доз реагентов насыщение не обнаружено. Наблюдалась обратная зависимость W от T_d : от 0,6 нм/цикл при 310 °C с выходом на постоянное значение около 0,027 нм/цикл при 440...500 °C. Вероятно такой вид зависимости соответствует переходу от области 2 к области 3, показанному выше на рисунке. На это, в частности, указывает полное окисление на воздухе ТП, полученных при 310 °C, и резкое возрастание скорости растворения в DHF. Основной вывод работы — рост ТП идет по реакции ХОГФ. При температурах получения ниже 400 °C ТП были сильно нестехиометрическими с [O] до 65 %; при $T_d = 500$ °C — [O] = 20 %, [Cl] = 2 %. Конформность осаждения оценена на уровне > 80 %.

Заключение

Основное направление развития технологий получения ТПНК при термической активации реагентов в реакторах циклического действия — снижение температуры процессов на 200—300 °C относительно промышленных процессов получения С-ТПНК в реакторах проточного типа. В целях изучения возможности реализации режимов атомно-слоевого осаждения исследованы процессы с использованием промышленных реагентов SiCl₄, SiH₂Cl₂ с NH₃, а также новых исходных кремнийсодержащих реагентов — олигомеров Si₂Cl₆, Si₃Cl₈. К сожалению, в редких публикациях приведены полные кинетические данные, на основании которых можно было бы судить о реализации режимов АСО. Из проанализированных публикаций возможный рост ТПНК в режиме АСО можно считать вероятным в работах [12, 23, 25]. Принципиально важным условием роста в таких режимах является повышенное внимание к вопросам подготовки поверхности подложки для исключения инкубационного периода при осаждении. Особенностью процессов является необходимость больших импульсных доз реагентов (высокого давления или длительности импульса), что не является прием-

лемым для промышленного использования таких процессов. При этом авторы ряда работ отмечали влияние импульса при осаждении на температуру подложки в реакторе, что необходимо учитывать при разработке методик осаждения ТП.

Судя по приведенным данным, в остальных публикациях рост ТПНК был, даже при циклической реализации процессов, скорее всего, по механизмам реакций ХОГФ с участием поверхности подложки. В большинстве исследований состав получаемых пленок был нестехиометричным в пользу обогащения кремнием. В составе низкотемпературных пленок в существенных концентрациях присутствовал кислород, приводя к показателю преломления на уровне 1,6...1,8. По совокупности результатов, приведенных в таблице, для получения близких к стехиометрии ТПНК температура осаждения должна быть не ниже 500 °C. При этом, однако, необходимо учитывать возможность протекания реакций термораспада исходных кремнийсодержащих реагентов с азотированием образовавшегося аморфного кремния.

В настоящий момент данных о радикальном улучшении конформности осаждения методами АСО для ТПНК не приведено.

Список литературы

1. **Васильев В. Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 1. Термически активированные процессы в проточных реакторах // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 5. С. 287—296.
2. **Васильев В. Ю.** Тренды развития методов химического осаждения из газовой фазы тонкопленочных материалов для прецизионных технологий // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 9. С. 37—44.
3. **Vassiliev V. Y., Sudijono J. L., and Cuthbertson A.** Trends in Void-Free Pre-Metal CVD Dielectrics // Solid State Technol. 2001. Vol. 44, N. 3. P. 129—136.
4. **Vasilyev V. Yu., Chung S.-H., Song Y. W.** Quantifying ALD technology for High Aspect Ratio Structures // Solid State Technol. 2007. Vol. 50, N. 8. P. 53, 54, 56.
5. **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.
6. **Knoops H. C. M., Langereis E., Van de Sanden M. C. M., Kessels W. M. M.** Conformality of Plasma-Assisted ALD: Physical Processes and Modelling // J. Electrochem. Soc. 2010. Vol. 157, N. 12. P. G241—G249.
7. **Johnson R. W., Hultqvist A., Bent S. F.** A brief review of atomic layer deposition: from fundamentals to applications // Materials today. 2014, Vol. 17, N. 5. P. 236—246.
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 // ECS J. of Solid State Sci. and Technol. 2017. Vol. 6, N. 10. P. P691—P714.
10. **Putkonen M., Niinistö L.** Organometallic Precursors for Atomic Layer Deposition // Top. Organomet. Com. 2005. Vol. 9. P. 125—145.
11. **Everstein F. C., Put B. N.** Influence of AsH₃, PH₃, and B₂H₆ on the Growth Rate and Resistivity of Polycrystalline Silicon Films Deposited from a SiH₄—H₂ Mixture // J. Electrochem. Soc. 1973. Vol. 120, N. 1. P. 106—110.
12. **Klaus J. W., Ott A. W., Dillon A. C., et al.** Atomic layer controlled growth of Si₃N₄ films using sequential surface reactions // Surface Science. 1998. Vol. 418. P. L14—L19.
13. **Ooba K., Nakashima Y., Nakajima A., et al.** Self-Limiting Atomic-Layer Selective Deposition of Silicon Nitride by Temperature-Controlled Method // Ext. Abstr. 1998 Int. Conf. Solid State Dev. Mater. 1998. Hiroshima. P. 22—23.
14. **Nakajima A., Yoshimoto T., Kidera T., et al.** Atomic-layer-deposited silicon-nitride/SiO₂ stacked gate dielectrics for highly reliable p-metal—oxide—semiconductor field-effect transistors // Appl. Phys. Let. 2000. Vol. 77, N. 18. P. 2855—2857.
15. **Nakajima A., Yoshimoto T., Kidera T., et al.** Low-temperature formation of silicon nitride gate dielectrics by atomic-layer deposition // Appl. Phys. Let. 2001. Vol. 79, N. 5. P. 665—667.
16. **Nakajima A., Khosru Q. D. M., Yoshimoto T., et al.** NH₃-annealed atomic-layer-deposited silicon nitride as a high-k gate dielectric with high reliability // Appl. Phys. Let. 2002. Vol. 80, N. 7. P. 1252—1254.
17. **Nakajima A., Khosru Q. D. M., Yoshimoto T., et al.** Low-temperature formation of highly reliable silicon-nitride gate dielectrics with suppressed soft-breakdown phenomena for advanced complementary metal—oxide—semiconductor technology // J. Vac. Sci. Technol. B. 2002. Vol. 20, N. 4. P. 1406—1409.
18. **Nakajima A., Khosru Q. D. M., Yoshimoto T., et al.** Atomic-layer-deposited silicon-nitride/SiO₂ stack — a highly potential gate dielectrics for advanced CMOS technology // Microelectronics Reliability. 2002. Vol. 42. P. 1823—1835.
19. **Nakajima A., Khosru Q. D. M., Yoshimoto T., et al.** High quality atomic-layer-deposited ultrathin Si-nitride gate dielectrics with low density of interface and bulk traps // Appl. Phys. Let. 2003. Vol. 83, N. 2. P. 335—337.
20. **Zhu S., Nakajima A.** Atomic Layer Deposition of HfO₂ and Si Nitride on Ge Substrates // Jap. J. Appl. Phys. 2007. Vol. 46, N. 12. P. 7699—7701.
21. **Lee W.-J., Lee J. H., Park C. O., et al.** A Comparative Study on the Si Precursors for the Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride Thin Films // J. Kor. Phys. Soc. 2004. Vol. 45, N. 5. P. 1352—1355.
22. **Lee W.-J., Kim U. J., Han C.-H., et al.** Characteristics of Silicon Nitride Thin Films Prepared by Using Alternating Exposures of SiH₂Cl₂ and NH₃ // J. Kor. Phys. Soc. 2005. Vol. 47, N. 11. P. S598—S602.
23. **Goto H., Shibahara K., Yokoyama S.** Atomic layer controlled deposition of silicon nitride with self-limiting mechanism // Appl. Phys. Let. 1996. Vol. 68, N. 23. P. 3257—3259.
24. **Yokoyama S., Ikeda N., Kajikawa K., et al.** Atomic-layer selective deposition of silicon nitride on hydrogen-terminated Si surfaces // Appl. Surf. Sci. 1998. Vol. 130—132. P. 352—356.
25. **Morishita S., Sugahara S., Matsumura M.** Atomic-layer chemical-vapor-deposition of silicon-nitride // Appl. Surf. Sci. 1997. Vol. 112. P. 198—204.
26. **Park K., Yun W.-D., Choi B.-J., et al.** Growth studies and characterization of silicon nitride thin films deposited by alternating exposures to Si₂Cl₆ and NH₃ // Thin Solid Films. 2009. Vol. 517. P. 3971—3978.
27. **Granneman E., Fischer P., Pierreux D., et al.** Batch ALD: Characteristics, comparison with single wafer ALD, and examples // Surf. Coat. Technol. 2007. Vol. 201. P. 8899—8907.
28. **Riedel S., Sundqvist J., Gumprecht T.** Low temperature deposition of silicon nitride using Si₃Cl₈ // Thin Solid Films. 2015. Vol. 577. P. 114—118.

V. Yu. Vasilyev, 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:

Vasilyev 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 2. Processes in Cycle-Type Reactors with Thermal Activation

Received on January 12, 2018
Accepted on February 01, 2018

The second part of the review contains analysis of the status and possible directions of development of the technologies for obtaining of silicon nitride thin films for the microelectronic and microsystem applications during a thermal activation of the initial reagents in the cycle-type reactors with a consecutively pulsed reactant injection. It also considers the results of the studies of the feasibility of the atomic-layer deposition (ALD) mode at 300...650 °C with the use of the industrial reagents of SiCl_4 , SiH_2Cl_2 , and oligomers (Si_2Cl_6 , Si_3Cl_8), and points out the works, in which the ALD mode is most probable; in the other works the film growth occurs according to CVD schemes of the chemical deposition involving the surface of the substrate. At temperatures below 500 °C the films are nonstoichiometric, enriched with silicon, and contain a lot of oxygen, as well as impurities of hydrogen and chlorine. The achieved film conformality on the structures with the aspect ratio of 60 was less than 80 %.

Keywords: silicon nitride, thin films, thermally activated reactions, cycle-type reactors, integrated circuits, microelectromechanical systems

For citation:

Vasilyev V. Yu. Silicon Nitride Thin Film Deposition for Microelectronics and Microsystem Technologies.

Part 2. Processes in Cycle-Type Reactors with Thermal Activation, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 329–339.

DOI: 10.17587/nmst.20.329-339

Introduction

The work [1] analyzed the state of the technologies for obtaining of thin films (TF) of silicon nitride (SNTF) for application in the technologies of the integrated circuits (IC) and nano- and microelectromechanical systems (MEMS). The following aspects were considered: a) The state of the industrial processes of the chemical deposition from the gas phase (CVD) close by composition to stoichiometric Si_3N_4 with ratio of Si : N = 1 : 1.33 and value of the refractive index $n = 2.02 \pm 0.02$ of high-temperature SNTF (hereinafter – S-SNTF) in the low-pressure CVD reactors (LPCVD) of a flow type with a thermal activation of the chemical reactions of ammonolysis of the initial silicon-containing reagents (SiH_4 , SiCl_4 and SiH_2Cl_2); b) Directions for development of the thermally activated processes of CVD S-SNTF; c) The results of the search for new initial reagents, conditions of the processes, and new designs of reactors for CVD.

The developing integrated technologies require new methods for obtaining of TF, in particular, allowing us to solve the task of obtaining of the conformal TF in modern devices with high aspect ratios. With reference to the elementary case of a relief in the form of a deepening of a rectangular form with vertical walls on a flat surface of the relief, the aspect ratio is the ratio of the height of the deepening to its width. In the most general case, the conformality of TF deposition is understood as the expressed in percentage ratio of the thickness of a film on a side-wall of the relief deepening to the thickness of the film on the top flat surface near the deepening. The methodology and characterization of the conformality for the CVD TF processes are considered by the author in the works [2–4], the interrelation of TF growth conformality and the kinetic characteristics of the CVD processes is systematized in the work [5]. In particular, the author demonstrated that in case of obtaining of TF by the activated methods, during a Plasma-Enhanced CVD (PECVD), for example, it was impossible to achieve a satisfactory conformality of TF growth in the high-aspect ratio structures. In more detail this case was considered in the work [6].

For solving of the tasks of creation of the conformal coatings on the high-aspect ratio structures of modern IC and MEMS it appears to be promising to use a version of the cyclic organization of the processes, in which the reagents are supplied to the typical reactors for CVD as the consecutive dosed pulses. In a general case such cyclic processes, for example, are dubbed as "pulsed-CVD". One of the versions of such a process is the so-called method of Atomic Layer Deposition (ALD) [7], based on realization in some cases of the effect of the self-limiting adsorption of one of the reagents on the surface of a substrate with its subsequent reaction with the second reagent injected into the reactor. Technically this is ensured by separation of the pulses of the reagents by pulses of an inert gas or vacuum pumping for a complete removal of the remains of one reagent before injection of another one, which absolutely excludes probability of the chemical processes in the gas phase. If the effect of the self-limiting adsorption is realized, the ALD process is carried out strictly on the surface of the substrate, while the diffusion processes are not limiting. Thus, the conditions for the growth of considerably more conformal coatings on the high-aspect ratio structures are created.

In recent years the ALD method has also been considered for deposition of SNTF mainly in two directions: at relatively high (although lower than the traditional CVD) temperatures with a thermal activation of the reagents, and at low temperatures, as a rule, with a plasma activation of the nitrogen-containing reagent. At a low-temperature ALD with the activation, the conformality of growth on the high-aspect ratio structures is not satisfactory [6, 8, 9], while the composition of the films is not stoichiometric. In the work [1] such films are characterized as "silicon-nitrogen-hydrogen-containing thin films" (SiNH-TF). Such films are of separate interest and we will not consider them in the present review.

The aim of Part 2 of the review of the publications in recent two decades is an analysis of the state and directions for development of the technologies for obtaining of SNTF in the cycle-type reactors with a thermal activation of the chemical reactions. As of the end of 2017, no generalizing works on this topic were available.

General characteristic of the cyclic thermally activated CVD processes

For realization of ALD on the effect of the self-limiting adsorption of one of the initial reagents, this "first" reagent (also called "predecessor", "precursor") is injected into the reactor by doped pulses with the concentration of molecules, sufficient for realization of the self-limiting adsorption of the reagent without its thermally activated decomposition on the surface. Then, the remains of the first reagent are deleted by a pulse of an inert gas or vacuum pumping, and a doped pulse injection of the "second" reagent with the concentration, sufficient for realization of the chemical reaction, is carried out. The molecules of the second reagent interact with the molecules of the first reagent adsorbed on the surface of the substrate directly, without formation of any intermediate products, forming, in an ideal case, one monolayer of the end-product in one deposition cycle. After removal of the surplus of the second reagent and the by-products of the chemical reaction, the process cycle comes to the end. Thus, formation of a product of the chemical reaction distinguishes ALD directly and in principle from CVD in the flow reactors, where a simultaneous injection of the initial reagents causes formation of the intermediate products of reaction of the initial reagents.

In case of ALD, a layer-by-layer growth can be realized under certain conditions. The figure presents schematic versions of the temperature dependences of the growth of films in case of CVD [10]. The ALD growth mode (in case of its realization) is localized in a rather narrow range of the nearly constant temperature ($\Delta T = T_2 - T_1$), called "ALD window", designated as 3 in the figure. This mode may be preceded by the areas of limitation of the growth process of film 1 by a low reactionary ability and condensation 2. After "ALD window" the areas of limitation of the growth process can be realized by desorption of the initial precursor 4 or the reaction of the thermal decomposition of the precursor according to a mechanism of CVD reactions with participation of the processes in the gas phase 5. For regular CVD processes the areas 1 and 5 are typical. "ALD windows" can appear in case, when the CVD process actively involves the surface of the substrate, on which the heterogeneous reactions of TF formation may take place.

We should point out that "ALD window" is located in the field of the temperatures below those ones for the CVD processes, while the growth rates of TF at CVD repeatedly exceed those at ALD in one process cycle, which do not surpass the thickness of the monolayer. We should also point out that the above considered case of the self-limiting adsorption is an idealized one, because in a number of cases of the cyclic organization of the process the thermal decomposition of the adsorbed reagent is possible and then the growth of TF occurs in accordance with the heterogeneous mechanisms of CVD.

Thus, during deposition of concrete TF, the aim of the research is detection and quantitative characterization of "ALD windows". At that, the cyclic organization of the process with the consecutive-pulse injection of the reagents is compulsory for realization of the effect of the self-limiting adsorption.

Directions of technologies for obtaining of SNTF in the cycle-type reactors

Unfortunately, most of the information sources wrongly understand "ALD method" as all the cyclically organized TF deposition processes, including the ones, which cannot be considered as such. Development of the cyclic processes for obtaining of SNTF (just like for the CVD processes in the flow reactors [1]) goes in two directions.

Direction 1 includes research of the possibilities for realization of the ALD method in case of the thermal activation of the reagents at a lowered temperature in relation to the industrial processes of CVD S-SNTF [1]. In this case of interest is a possibility of the use of both the traditional industrial reagents and the new reagents. Exactly this direction is of a great interest for the promising developments of IC and MEMS with the high aspect ratio structures.

Direction 2 includes the low-temperature methods for obtaining of TF with application, as a rule, of various versions of additional plasma activation of the nitrogen-containing reagents. Development of this direction is determined by new, mainly low-temperature di-

rections for application of TF. When the author worked on the present review, a considerable by volume [9] publication appeared, the authors of which made an attempt to cover a large array of data concerning mainly the plasma-activated SiNH-TF. The authors considered the films received in the traditional plasma reactors, in high density plasma, and also the ALD methods with the plasma activation. Here, it is also necessary to underline that, notwithstanding the numerous assertions that the plasma methods for obtaining of TF allow us to solve the tasks of obtaining of the conformal coatings, so far, there are no convincing experimental proofs of that [6]. More than that, the conclusions made by the author in the earlier publications [3–5] substantiated directly the potential impossibility of obtaining of the conformal coatings by the methods with activation of the gas phase at CVD, to which the activated ALD methods can also be referred to. Since the low-temperature methods for obtaining of TF demand a special hardware realization, strictly speaking, the deposition processes are not chemical processes and for them there are no gross-reaction processes, no generalizing ideas about the schemes and mechanisms of the processes, while SiNH-TF have a lot of restrictions concerning their applicability in view of the potential nonconformity, in the given review the results of the research in direction 2 are not considered.

Analysis of versions of direction 1

Use of the traditional industrial reagents. The industrial processes for obtaining of S-SNTF for IC and MEMS are realized in the flow LPCVD in the ammonolysis reactions of SiH_4 , SiCl_4 and SiH_2Cl_2 (basic reagent) [1]. In view of the thermal decomposition of SiH_4 at temperatures above 520 °C [11], the research concerning the feasibility of realization of the ALD mode was done only for SiCl_4 and SiH_2Cl_2 [12–16].

The authors of the work [12] did their research at 427...627 °C in a high-vacuum individual chamber at different temperatures (T_d) and pressures (P_d). The substrate of Si (100) was cleaned by methanol, acetone and de-ionized water, then it was blown by the air cleaned from the microparticles, warmed up in a reactor at 602 °C during 1 minute and then it was subjected to the influence of H_2O plasma for removal of carbon, which as a result made it possible to receive SiO_2 with thickness of about 2 nm and with a hydroxylated surface (SiOH^*). Then, at the desirable temperature of the substrate, a dose of SiCl_4 was injected $\geq 2 \cdot 10^9$ L (L — Langmuir unit of measure = 10^{-6} torr · s, product of pressure P_d on duration of pulse of reagent t), the reaction of which with the surface is described by the following scheme: $\text{SiOH}^* + \text{SiCl}_4 \rightarrow \text{SiOSiCl}_3^* + \text{HCl}$ (here and below the surface groups are designated with asterisks). During the next injection of ammonia, the dose $\geq 1.8 \cdot 10^{10}$ L, the following reaction was assumed: $\text{SiOSiCl}_3^* + \text{NH}_3 \rightarrow \text{SiOSiH}_2^* + \text{HCl}$. After several consecutive cycles of injection of SiCl_4 and NH_3 the surface was transformed from SiO_2 into Si_3N_4 (the corresponding schemes are not presented). This, according to the authors, made it possible to carry out the growth research on the in-situ generated S-SNTF. As an explanation of the schemes of the process, the authors assumed the course of two reactions at the corresponding pulses of SiCl_4 and NH_3 : $\text{SiNH}^* + \text{SiCl}_4 \rightarrow \text{SiNSiSl}_3^* + \text{HCl}$ and $\text{SiCl}^* + \text{NH}_3 \rightarrow \text{SiNH}_2^* + \text{HCl}$. At the parameters presented in the Table here, S-SNTF were formed without a nucleation delay by the linear dependence on the number of the cycles of deposition with the constant rate W , with the refractive index $n = 2.01 \pm 0.05$ and with a very small surface roughness equal to 0.3 nm. The authors explained the twice as little W at the lower temperatures by a lower reactionary ability of the surface. Probably, this corresponds to the transition from area 1 to area 3 in the figure presented above.

Research of the work [13] was done in an experimental reactor of a small size. The data concerning preparation of the substrate surface are not available. Specific features of the research are the use of different T_d during injection of SiCl_4 and NH_3 and of intermediate high-temperature annealing (900...1050 °C) between the moments of injection of the reagents. The annealing revealed selectivity of the deposition rate on the surfaces of Si and SiO_2 ; the correlation was 2 : 1 at 900 °C and 20 : 1 at 1050 °C. The effect of annealing was explained by SiO_2^* and the adsorbed atom of Si^* according to the scheme $\text{SiO}_2^* + \text{Si}^* \rightarrow 2 \text{SiO}$ (volatile product). The films were nonstoichi-

ometric, the concentration of oxygen (hereinafter, [O], at. %) was about 20 %, the residual gases or impurities in the initial reagents were considered as the source of oxygen. The topic was developed in a number of publications [14–19], the authors of which studied the transistor structures with SNTF on Si (001) substrates doped with boron with resistance of 15 [15, 17] and 10 [14, 16] $\Omega \cdot \text{cm}$. Proceeding from a brief review of the totality of the data from these publications on the deposition process we will note the following: a) The data on the used equipment are not presented; b) Processing of the surfaces was done in the solution of $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ with the proportion of 0.15 : 3 : 7 at 80 °C during 10 minutes and the subsequent saturation (so called termination) of the surface with hydrogen in the solution of HF (hereinafter DHF) diluted by water down to 0.5 % for prevention of formation of a natural oxide; c) Injection of the reagents was done with the parameters specified in the Table; d) The thickness of the films was about 0.4 nm [14, 18], 3.5 nm (20 cycles) [15] and 4.5 nm (30 cycles) [19]; e) After the process the films were annealed in NH_3 at 550...600 °C during 1.5 h.

Growth of TF on the substrates of Ge (100) [20], preliminary processed in DHF and annealed in NH_3 at 500 °C during 10 min just before the deposition process, demonstrated a very low deposition rate (Table).

Comparison of the efficiency of the reagents of SiCl_4 and SiH_2Cl_2 with the use of NH_3 was done in the work [21] in the volume reactors (see figure *a* in the work [1]) on the Si (100) substrates doped with boron and preliminary processed by BOE (Buffered Oxide Etchant). The deposition rate of the nonstoichiometric TF depended linearly, without saturation, on the doses of the reagents within intervals of $(0.2...5.8) \cdot 10^{10} \text{ L}$ and $(0.8...3.2) \cdot 10^9 \text{ L}$ for pairs of $\text{SiCl}_4-\text{NH}_3$ and $\text{SiH}_2\text{Cl}_2-\text{NH}_3$, accordingly, reaching the values specified in the Table. The higher speeds of dissolution of the thin films obtained from $\text{SiH}_2\text{Cl}_2-\text{NH}_3$ were connected with the higher concentration of hydrogen ([H], at. %) in them in view of its presence in SiH_2Cl_2 . In the work [22] the same authors studied the system of $\text{SiH}_2\text{Cl}_2-\text{NH}_3$ and considered the structure and properties of TF within the range of 450...550 °C in more detail. The deposition rate resulted in the saturation with the value of about 0.08 nm/cycle took place only at 450 °C and the doses of the reagents of $(0.6...6) \cdot 10^{10} \text{ L}$. However, such TF turned out to be 40 times more quick-dissolving in DHF as compared to S-SNTF, and unstable in time. During the two days of exposition to the open air, a 20 % growth of the film thickness and lowering of the value of *n* from 2.3 down to 1.8 were observed. The films grown at higher temperatures also turned out to be more stable and resistant to solutions of DHF. However, at $T_d > 450$ °C and all the studied doses of the reagents (from $0.3 \cdot 10^{10} \text{ L}$ up to $6 \cdot 10^{10} \text{ L}$) there was no saturation testifying in favor of the ALD mode, while the value of *W* reached 0.4...0.45 nm/cycle, exceeding the monolayer considerably.

In conclusion we will mention the first by time and the most frequently cited works [23, 24], although they present not a strictly thermally activated reception of TF from dichlorosilane. In the work [23] the system of $\text{SiH}_2\text{Cl}_2-\text{NH}_3$ was used at temperature of 200...550 °C, however, the ammonia, injected into the reactor by pulses as the first reagent, was subjected to a preliminary remotely plasma-activated decomposition at the frequency of 2.45 GHz and plasma power of 30...60 W. Before the deposition the substrates of Si (100) doped with boron and resistance of $10 \Omega \cdot \text{cm}$ were first processed in the solution of $\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{NH}_4\text{OH} = 100 : 20 : 1$ with the subsequent immersion in DHF and rinsing in the de-ionized water within 1 minute. Such a processing made it possible to terminate completely the surface by hydrogen. Certain parameters of the processes are presented in the Table. Duration of the exposition in dichlorosilane was 45...450 s, the optimal was 90 s. The reaction resulted in saturation with the rate of about 0.09 nm/cycle in most of the experimentally verified conditions within the range of temperatures of 200...400 °C. At high temperatures the rate of deposition started to increase sharply. The nonstoichiometric TF had *n* = 1.6...1.7; [O] ≈ 7 % (which was explained by a possible dispersion of the quartz walls of the generator of plasma), [H] ≈ 13 %, chlorine ([Cl] at. %) ≈ 0.5 %.

The authors of the work [24] investigated the deposition of SNTF at 375 °C with the use of a forced activation on a heated up to 1700 °C tungsten tape of the pulse injected ammonia (the method is called

Catalytic CVD, Cat-CVD, or Hot-Wire CVD, HWCVD). At that, the pulse of the partially dissociated ammonia was the first. The substrates doped with boron Si (100) were processed in DHF for termination of the surface by hydrogen; for comparison the substrates and S-SNTF grown at CVD were used. The basic results are presented above, in the Table. Growth rate saturation was observed during the pulses of dichlorosilane over 90 s and of the dissociated ammonia — over 20 s. The authors discovered a considerably different growth of the films on the silicon substrates (linear growth of the number of cycles) and silicon nitride, on which a prolonged (~30 cycles) incubation period (nucleation delay) took place, explained by a lack of $\text{Si}-\text{H}_x$ groups on the S-SNTF surface, which are available on the terminated silicon surface. The concentrations of oxygen and chlorine in the film were about 2 at. %. The refraction index was about 1.85, the speed of dissolution in HF solutions approached to that of S-SNTF.

New reagents for obtaining of SNTF. The new substances for reception of the nitride of silicon became the oligomers of Si_2Cl_6 [25, 26], Si_3H_8 [27], and Si_3Cl_8 [28].

The authors of the work [25] studied the growth of TF in an experimental reactor with participation of Si_2Cl_6 and hydrazine N_2H_4 at temperature of 427...700 °C (optimal — 600 °C). The hydrazine was supplied first for the termination of the surface. According to the authors, realization of the ALD mode (saturation by both reagents) took place at $P_d < 133 \text{ Pa}$. At $P_d > 133 \text{ Pa}$ the speed of the deposition increased twice and over, which was explained by the reaction in the gas phase of the remains of the reagents. In SNTF, close by composition to the stoichiometric ones, [O] = 4 % was found (explained by the presence in the hydrazine with cleanliness of 98 % of the traces of water), as well as [H] < 1 %, [Cl] — below the detection limit.

The authors of the work [26] studied the $\text{Si}_2\text{Cl}_6-\text{NH}_3$ system in a reactor with cold walls at the temperature of the process of 515...573 °C and doses of the reagents of $(0.1...3) \cdot 10^8 \text{ L}$ for Si_2Cl_6 and $(1...10) \cdot 10^8 \text{ L}$ for NH_3 (see the Table). It was revealed, that the real temperature of substrate T_d measured by the calibrated thermocouples, in case of a pulse injection of the reagents is essentially less than the set "process temperature": 453, 496 and 513 °C against 515, 557 and 573 °C, accordingly. Si (100) substrates doped with boron and processed in BOE with the subsequent washing in the de-ionized water were used. Saturation of the deposition speed took place at doses $> 1 \cdot 10^8 \text{ L}$ for both reagents. At $T_d > 513$ °C the deposition speed increased sharply, corresponding to the transition from area 3 to area 5 (see figure). According to the authors, at $T_d > 500$ °C the deposition of TF goes in two directions: ALD and nitridation of the silicon TF — a product of the thermal decomposition of Si_2Cl_6 (its beginning is estimated at 500 °C). The nonstoichiometric films had *n* = 1.7...1.8, [O] = ~8 % (the result of oxidation by the air after the process), [Cl] — below the detection limit.

In the work [27] with reference to the industrial volume low pressure reactor with hot walls (see figure *a* in the work [1]) an example of synthesis of the films was considered at a low temperature and cyclic organization of the process with the use of Si_3H_8 . The process of $W < 0.01 \text{ nm/cycle}$ is not an ALD as such, and it was carried out by the thermal decomposition of Si_3H_8 with the subsequent conversion of the formed amorphous silicon into the silicon nitride by means of several versions of activation by plasma of the nitrogen-containing reagents. The refraction indexes for the films enriched with silicon were: for N_2 *n* = 2.1, for $\text{N}_2 + \text{NH}_3$ (low concentration) *n* = 2.18, for $\text{N}_2 + \text{NH}_3$ (high concentration) *n* = 2.77.

The authors of the work [28] investigated $\text{Si}_3\text{Cl}_8-\text{NH}_3$ system (see conditions in the Table) on the substrates with the structures with the aspect ratio equal to 60 and natural silicon oxide without processing. In the range of the investigated doses of the reagents no saturation was discovered. An inverse dependence of *W* on T_d was observed: from 0.6 nm/cycle at 310 °C with a resulting constant value of about 0.027 nm/cycle at 440...500 °C. That kind of dependence, probably, corresponds to the transition from area 2 to area 3 in the figure. This is confirmed, in particular, by a complete oxidation in the air of TF obtained at 310 °C and a sharp increase of the speed of dissolution in DHF. The main conclusion from the work is that the growth of TF proceeds according to CVD reaction. At the temperatures of obtaining below 400 °C, TF were very nonstoichiometric with [O] up to

65 %; at $T_d = 500^\circ\text{C}$ – [O] = 20 %, [Cl] = 2 %. The conformality of the deposition was estimated at the level of > 80 %.

Conclusion

The main direction in development of the technologies for obtaining of SNTF at a thermal activation of the reagents in the cycle-type reactors is a decrease of the temperature of the processes by 200–300 °C compared with the industrial processes for obtaining of S-SNTF in the flow-type reactors. With a view of studying of the feasibility of realization of the atomic-layer deposition modes, the processes were investigated with the use of the industrial reagents of SiCl_4 , SiH_2Cl_2 , NH_3 , and also new initial silicon-containing reagents—oligomers of Si_2Cl_6 , Si_3Cl_8 . Unfortunately, rare publications present full kinetic data, on the basis of which it would be possible to judge about the realization of the ALD modes. From the analyzed publications, a growth of SNTF in ALD mode can be considered possible in the works [12, 23, 25]. An essentially important condition for the growth in such modes is a special attention to the aspects of preparation of the substrate surface for elimination of the incubation period during the deposition. A specific feature of the processes is the necessity for large pulse doses of the reagents (high pressure or long duration of a pulse), which is not acceptable for the industrial use of such processes. At that, the authors of certain works pointed out the influence of a pulse on the substrate temperature during the deposition in the reactor, which should be taken into account in development of the techniques of TF deposition.

Judging by the presented data, in the other publications the growth of SNTF was present, even during the cyclic realization of the processes, most likely, according to the mechanisms of the CVD reactions with participation of the substrate surface. In most of the research works the composition of the obtained films was nonstoichiometric in favor of the enrichment with silicon. The composition of the low-temperature films included oxygen in essential concentrations, which resulted in the refraction index at the level of 1.6...1.8. By the totality of the results presented in the Table, for obtaining of SNTF close to stoichiometry the deposition temperature should be not less than 500 °C. However, at that, it is necessary to consider a possibility of the course of the reactions of the thermal decomposition of the initial silicon-contained reagents with nitridation of the formed amorphous silicon.

At the moment, there are no available data about a radical improvement of the conformality of the deposition by ALD methods for SNTF.

References

1. Vasilyev V. Yu. Tehnologii poluchenija tonkih plenok nitrida kremnija dlja mikroelektroniki i mikrosistemnoj tekhniki. Chast 1. Termicheski aktivirovannye processy v protochnyh reaktorah, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 287–296 (in Russian).
2. Vasilyev V. Yu. Trendy razvitiya metodov himicheskogo osazhdnenija iz gazovoj fazy tonkoplenochnyh materialov dlja precizionnyh tehnologij, *Nano- i mikrosistemnaja tekhnika*, 2014, N. 9 (170), pp. 37–44 (in Russian).
3. Vassiliev V. Y., Sudijono J. L., and Cuthbertson A. Trends in Void-Free Pre-Metal CVD Dielectrics, *Solid State Technol.*, 2001, vol. 44, no. 3, pp. 129–136.
4. Vasilyev V. Yu., Chung S.-H., Song Y. W. Quantifying ALD technology for High Aspect Ratio Structures, *Solid State Technol.*, 2007, vol. 50, no. 8, pp. 53, 54, 56.
5. 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.
6. Knoops H. C. M., Langereis E., Van de Sanden M. C. M., Kessels W. M. M. Conformality of Plasma-Assisted ALD: Physical Processes and Modelling, *J. Electrochem. Soc.*, 2010, vol. 157, no. 12, pp. G241–G249.
7. Johnson R. W., Hultqvist A., Bent S. F. A brief review of atomic layer deposition: from fundamentals to applications, *Materials today*, 2014, vol. 17, no. 5, pp. 236–246.
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. 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, *ECS J. of Solid State Sci. and Technol.*, 2017, vol. 6, no. 10, pp. P691–P714.
10. Putkonen M., Niinistö L. Organometallic Precursors for Atomic Layer Deposition, *Top. Organomet. Com.*, 2005, vol. 9, pp. 125–145.
11. Everstein F. C., Put B. N. Influence of AsH_3 , PH_3 , and B_2H_6 on the Growth Rate and Resistivity of Polycrystalline Silicon Films Deposited from a SiH_4 – H_2 Mixture, *J. Electrochem. Soc.*, 1973, vol. 120, no. 1, pp. 106–110.
12. Klaus J. W., Ott A. W., Dillon A. C., et al. Atomic layer controlled growth of Si_3N_4 films using sequential surface reactions, *Surface Science*, 1998, vol. 418, pp. L14–L19.
13. Ooba K., Nakashima Y., Nakajima A., et al. Self-Limiting Atomic-Layer Selective Deposition of Silicon Nitride by Temperature-Controlled Method, *Ext. Abstr. 1998 Int. Conf. Solid State Devol. Mater.* 1998, Hiroshima, pp. 22–23.
14. Nakajima A., Yoshimoto T., Kidera T., et al. Atomic-layer-deposited silicon-nitride/ SiO_2 stacked gate dielectrics for highly reliable p-metal—oxide—semiconductor field-effect transistors, *Appl. Phys. Let.*, 2000, vol. 77, no. 18, pp. 2855–2857.
15. Nakajima A., Yoshimoto T., Kidera T., et al. Low-temperature formation of silicon nitride gate dielectrics by atomic-layer deposition, *Appl. Phys. Let.*, 2001, vol. 79, no. 5, pp. 665–667.
16. Nakajima A., Khosru Q. D. M., Yoshimoto T., et al. NH_3 -annealed atomic-layer-deposited silicon nitride as a high-k gate dielectric with high reliability, *Appl. Phys. Let.*, 2002, vol. 80, no. 7, pp. 1252–1254.
17. Nakajima A., Khosru Q. D. M., Yoshimoto T., et al. Low-temperature formation of highly reliable silicon-nitride gate dielectrics with suppressed soft-breakdown phenomena for advanced complementary metal—oxide—semiconductor technology, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, vol. 20, no. 4, pp. 1406–1409.
18. Nakajima A., Khosru Q. D. M., Yoshimoto T., et al. Atomic-layer-deposited silicon-nitride/ SiO_2 stack — a highly potential gate dielectrics for advanced CMOS technology, *Microelectronics Reliability*, 2002, vol. 42, pp. 1823–1835.
19. Nakajima A., Khosru Q. D. M., Yoshimoto T., et al. High quality atomic-layer-deposited ultrathin Si-nitride gate dielectrics with low density of interface and bulk traps, *Appl. Phys. Let.*, 2003, vol. 83, no. 2, pp. 335–337.
20. Zhu S., Nakajama A. Atomic Layer Deposition of HfO_2 and Si Nitride on Ge Substrates, *Jap. J. Appl. Phys.*, 2007, vol. 46, no. 12, pp. 7699–7701.
21. Lee W.-J., Lee J. H., Park C. O., et al. A Comparative Study on the Si Precursors for the Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride Thin Films, *J. Kor. Phys. Soc.*, 2004, vol. 45, no. 5, pp. 1352–1355.
22. Lee W.-J., Kim U. J., Han C.-H., et al. Characteristics of Silicon Nitride Thin Films Prepared by Using Alternating Exposures of SiH_2Cl_2 and NH_3 , *J. Kor. Phys. Soc.*, 2005, vol. 47, no. 11, pp. S598–S602.
23. Goto H., Shibahara K., Yokoyama S. Atomic layer controlled deposition of silicon nitride with self-limiting mechanism, *Appl. Phys. Let.*, 1996, vol. 68, no. 23, pp. 3257–3259.
24. Yokoyama S., Ikeda N., Kajikawa K., et al. Atomic-layer selective deposition of silicon nitride on hydrogen-terminated Si surfaces, *Appl. Surf. Sci.*, 1998, vol. 130–132, pp. 352–356.
25. Morishita S., Sugahara S., Matsumura M. Atomic-layer chemical-vapor-deposition of silicon-nitride, *Appl. Surf. Sci.*, 1997, vol. 112, pp. 198–204.
26. Park K., Yun W.-D., Choi B.-J., et al. Growth studies and characterization of silicon nitride thin films deposited by alternating exposures to Si_2Cl_6 and NH_3 , *Thin Solid Films*, 2009, vol. 517, pp. 3971–3978.
27. Granneman E., Fischer P., Pierreux D., et al. Batch ALD: Characteristics, comparison with single wafer ALD, and examples, *Surf. Coat. Technol.*, 2007, vol. 201, pp. 8899–8907.
28. Riedel S., Sundqvist J., Gumprecht T. Low temperature deposition of silicon nitride using Si_3Cl_8 , *Thin Solid Film*, 2015, vol. 577, pp. 114–118.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 535.8

DOI: 10.17587/nmst.20.340-350

У. О. Салгаева¹, зам. директора по общим вопросам, e-mail: ulyanasalgaeva@yandex.ru,
А. Р. Хасаншина¹, науч. сотр., e-mail: snicerslady@rambler.ru, **А. А. Козлов**², магистр,
e-mail: andreykozlov10031994@mail.ru, **А. А. Кондаков**¹, науч. сотр., e-mail: kondakow90@gmail.com,
А. Б. Волынцев², д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф., e-mail: voland@psu.ru, **Е. В. Моисеева**³, Ph. D.,
вед. инж.-технолог Центра Микро/Нано технологий, e-mail: evmois@gmail.com,
¹ ООО "Малое инновационное предприятие "Пермские нанотехнологии", Пермь,
² Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь,
³ Университет Луисвилля, Луисвилл, Кентукки, США

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА И ОДНОМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА ДЛЯ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Поступила в редакцию 10.11.2017

Для снижения габаритных размеров и расширения функциональных характеристик оптические датчики физических величин разрабатывают с использованием технологий интегральной фотоники. Для повышения точности измерений чувствительный элемент датчика может быть спроектирован на основе массива интегрально-оптических (ИО) элементов, оптические характеристики которых зависят от физико-химических параметров окружающей системы. Описано проектирование и особенности изготовления чувствительного элемента датчиков на основе ИО кольцевого резонатора, интегрированного с одномерным фотонным кристаллом (ФК). Впервые проведены исследования оптических и функциональных характеристик изготовленного элемента, экспериментально показано улучшение чувствительности кольцевого резонатора к изменению температуры в 2 раза при его интеграции с одномерным ФК. При усовершенствовании технологического процесса изготовления прогнозируется существенное улучшение рабочих характеристик элемента.

Ключевые слова: оптический кольцевой резонатор, гофрированный волновод, интегрально-оптические чувствительные элементы датчиков физических величин, датчик температуры

Введение

Кольцевой резонатор — интегрально-оптическое (ИО) устройство, представляющее собой замкнутый волновод (резонаторный контур), ввод и вывод оптического сигнала в который осуществляется с помощью канальных волноводов, оптически связанных с замкнутым волноводом, что позволяет энергии электромагнитной волны переходить из волноводов в кольцевой резонатор и обратно.

Кольцевые резонаторы применяются в ИО устройствах в качестве фильтров, демультиплексоров, чувствительных элементов датчиков физических величин и биосенсоров. Датчики на основе ИО чувствительных элементов обладают преимуществами волоконно-оптических датчиков (ВОД) на основе брэгговских решеток (БР): они стабильны

во времени, компактны, электро-, взрыво- и пожаробезопасны, невосприимчивы к магнитным и электрическим полям. Кроме того, они позволяют проводить мониторинг набора физических величин (температуры, давления, вибрации, угла поворота, химического состава) "в точке" благодаря малым размерам чувствительных элементов (от 300 нм в диаметре) и возможности их интеграции на подложке площадью менее 1 см², тогда как коммерчески доступные ВОД позволяют измерять только 1...2 физических величины и имеют размеры от 5 см. Датчики на основе ИО элементов обладают высокой чувствительностью к изменению физических величин по сравнению с ВОД: так, волоконный датчик температуры на основе БР имеет чувствительность к изменению температуры 10...15 пм/°C [1], чувствительность элемента на основе ИО коль-

цевого резонатора составляет $83 \text{ пм/}^{\circ}\text{C}$ и может быть существенно увеличена за счет незначительного изменения конструкции [2].

Принцип работы датчиков физических величин на основе кольцевых резонаторов заключается в том, что при изменении состояния окружающей системы происходит изменение оптического пути сигнала в чувствительном элементе за счет изменения эффективного показателя преломления в замкнутом оптическом волноводе или за счет других физических эффектов (например, эффекта Саньяка), что в конечном итоге оказывается на изменении характеристик оптического излучения, проходящего или отражающегося от чувствительного элемента.

Для повышения точности и чувствительности датчиков часто увеличивается радиус кольцевого резонатора или на одном кристалле интегрируется массив таких оптически связанных резонаторов, что влечет увеличение габаритных размеров чувствительных элементов. Перспективным методом увеличения точности и чувствительности датчиков на основе резонаторов является создание в его резонаторном контуре одномерного фотонного кристалла (ФК), характеризующегося периодическим изменением показателя преломления в направлении распространения излучения [3, 4]. Теоретические расчеты показывают, что точность датчика угловой скорости, основанного на таком виде резонаторов, может достигать $0,01^{\circ}/\text{ч}$, также в 1000 раз повышается добротность резонансного контура [3, 4]. Экспериментального подтверждения данных расчетов в источниках не обнаружено. Это может быть связано с тем, что экспериментальная реализация таких сложных топологий требует привлечения высокотехнологичной инструментальной базы, осуществления процесса изготовления в условиях чистых помещений, которыми большинство исследовательских групп не обладает.

В данной работе описаны проектирование чувствительного элемента датчиков на основе кольцевого оптического резонатора, интегрированного с одномерным ФК, на основе результатов численного и математического моделирования интегрально-оптических волноводов с использованием метода конечных разностей во временной области (англ. Finite Difference Time Domain, FDTD) и метода распространяющегося луча (англ. Beam Propagation Method, BPM); особенности его изготовления и сформированная топология, исследованная с помощью

сканирующего электронного микроскопа; приведены результаты исследования оптических и функциональных характеристик в качестве чувствительного элемента датчика температуры.

Проектирование и особенности изготовления чувствительного элемента

Для проектирования ИО элемента было проведено моделирование распространения излучения и расчет топологии базовых элементов на основе данных об используемых материалах и геометрии поперечного сечения волновода с обязательным учетом особенностей технологического цикла изготовления. ИО элементы, описанные в данной работе, разрабатывали с учетом технологии изготовления на основе волноводных структур из нитрида кремния. Моделируемый профиль поперечного сечения приподнятого волновода представлен на рис. 1, a.

Для проектирования топологии кольцевого резонатора было проведено моделирование канальных волноводов и области оптической связи, оценены спектральные характеристики резонатора. Моделирование распространения оптического излучения осуществлялось с применением программных продуктов, в которых решаются уравнения Максвелла и материальные уравнения методами конечных разностей во временной области и распространяющегося луча (например, FreeFDTD и FreeBPM, OptiGrating от Optiwave и др.).

Для проектирования канального оптического волновода были заданы параметры поперечного сечения структуры (рис. 1, a), показатели преломления материалов сердцевины волновода (Si_3N_4) и оболочки (SiO_2) при $T = 20^{\circ}\text{C}$ в диапазоне длин волн λ от 1,50 до 1,60 мкм с шагом 0,1 мкм. При этом показатели преломления материалов волновода и оболочки от длины волны (λ , нм) распро-

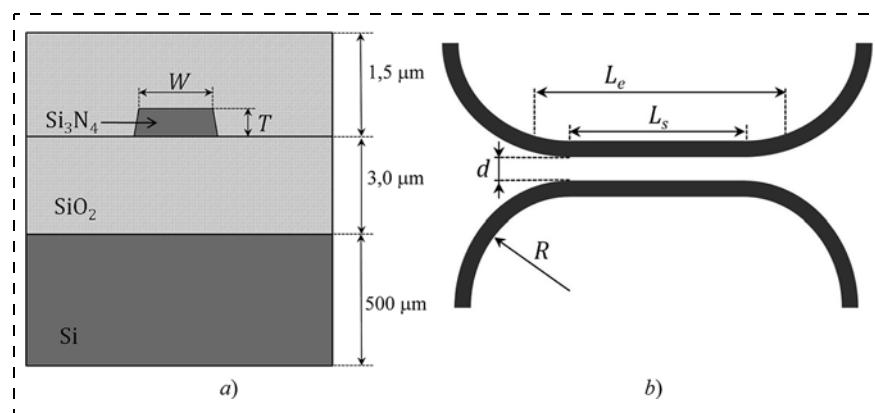


Рис. 1. Схематическое представление моделируемых и рассчитываемых структур: a — поперечное сечение канального волновода; b — вид и параметры области оптической связи канальных волноводов

Fig. 1. Schematic presentation of the modeled and calculated structures: a — cross-section of a channel waveguide; b — view and parameters of the area of the optical coupling of the channel waveguides

страняющегося излучения TE моды определяются формулами [5]:

$$n_{\text{SiO}_2}(\lambda) = \sqrt{\frac{1,09877\lambda^2}{\lambda^2 - 92,4317^2} + 1},$$

$$n_{\text{Si}_3\text{N}_4}(\lambda) = \sqrt{\frac{2,8936\lambda^2}{\lambda^2 - 139,67^2} + 1}.$$

Для минимизации возможных отклонений используемой модели волновода от волновода, формируемого в реальном технологическом цикле, при проектировании были учтены отклонение боковых стенок от вертикальности, характерная шероховатость боковых стенок и боковые растрывы. В ходе нескольких итераций проектирования, изготовления и измерений параметров структур было определено, что волновод шириной 1 мкм является многомодовым (согласно результатам моделирования), но моды высших порядков (кроме фундаментальной) рассеиваются на шероховатостях и неоднородностях боковых стенок волноводов. Все расчеты в данной работе проведены для оптического излучения TE моды.

При моделировании оптического волновода получены характерные эффективные показатели преломления фундаментальной моды n_{eff} для различных λ и ширины волновода W (для дальнейшего проектирования одномерного ФК) (см. таблицу).

Для создания чувствительного ИО элемента используются оптические резонаторы, в которых оптический сигнал распространяется по замкнутому контуру с минимальными потерями. Для этого при проектировании элемента закладываются минимально возможные значения коэффициента связи K — перекачки оптического излучения в резонатор из подводящего волновода (или из резонатора в отводящий волновод). Обычно K выбирают равным 0,01...0,15 в зависимости от характерных оптических потерь в замкнутом волноводе и рассчитывают по формуле [6]

$$K = \sin^2\left(\frac{\pi L_e}{2 L_b}\right), \quad (1)$$

Зависимость эффективного показателя преломления волновода от длины волны и ширины волновода

Dependence of the effective refraction index of the waveguide on the wavelength and width of the waveguide

$W, \mu\text{m}$	n_{eff}		
	$\lambda_1 = 1540 \text{ nm}$	$\lambda_2 = 1550 \text{ nm}$	$\lambda_3 = 1560 \text{ nm}$
1,000	1,5790	1,5768	1,5746
1,050	1,5849	1,5827	1,5804
1,100	1,5888	1,5866	1,5844
1,150	1,5953	1,5930	1,5909

где L_b — длина биений (перекачки), равная

$$L_b = \frac{0,5\lambda}{n_{eff,0} - n_{eff,1}}, \quad (2)$$

где $n_{eff,0}$ и $n_{eff,1}$ — эффективные показатели преломления мод нулевого порядка (фундаментальной) и первого порядка соответственно, распространяющихся по области двух близкорасположенных волноводов, рассчитанные для заданной длины волны и температуры. При длине области связи, равной $L_b/2$, $K \approx 1$, т. е. 100 % мощности (без учета потерь) оптического излучения перейдет из одного волновода в другой близкорасположенный. При этом L_e — эффективная длина области оптической связи — длина, при которой два близкорасположенных волновода еще являются оптически связанными (область оптической связи часто превышает область прямолинейного участка L_s , на основе которого проектируется элемент) [6]. Для обеспечения требуемой оптической связи и наименьшей ее вариации при проектировании топологии закладывалась X-образная форма области связи (рис. 1, b) с минимально возможными радиусами расхождения волноводов после области связи ($R = 50 \text{ мкм}$ при характерных потерях для $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$, равных $5 \cdot 10^{-6} \text{ дБ}$ на поворот на 90°).

При моделировании распространения излучения TE моды с длиной волны $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$ по двум прямолинейным приподнятым волноводам шириной $W = 1 \text{ мкм}$, расположенным на расстоянии $d = 0,6 \text{ мкм}$, были получены $n_{eff,0} = 1,58239$ и $n_{eff,1} = 1,56908$, вычислена $L_b = 58,22 \text{ мкм}$. При проектировании был выбран максимальный коэффициент связи $K = 0,15$ для гарантии работоспособности резонатора, снижения вероятности 100 %-го рассеяния введенного сигнала на неоднородностях, поэтому $L_e \approx 15 \text{ мкм}$.

Для обеспечения фиксированной оптической связи с подводящими и отводящими волноводами проектировался трековый резонатор с длиной прямолинейного участка 15 мкм и радиусами соединяющих полуокружностей 500 мкм.

Коэффициенты прохождения $t(\lambda) = \sqrt{1 - K(\lambda)}$ оптического излучения по волноводу и перекачки оптического излучения $k(\lambda) = \sqrt{K(\lambda)}$ равны для нашего случая $t = 0,92$ и $k = 0,39$.

Оценка спектральных характеристик резонатора осуществляется с учетом того факта, что по резонансному контуру может распространяться только оптический сигнал с длинами волн, укладывающиеся целое число раз на оптической длине контура $L_{\text{опт}}$ [7], так что $L_{\text{опт}} = m\lambda_m$, где λ_m является резонансной длиной волны и m — положительное целое число (порядок). Вместе с тем $L_{\text{опт}} = 2\pi R_r n_{eff}$, где R_r — радиус кольцевого резонатора и n_{eff} — эффективный показатель преломления волновода для заданной температуры и длины волны. Чтобы оп-

тический сигнал распространялся в кольцевом резонаторе, необходимо выполнение условия

$$2\pi R_r n_{eff} = m\lambda_m, \quad (3)$$

т. е. для фиксированного радиуса резонатора существует целый ряд длин волн, удовлетворяющих условию резонанса. Разница между длинами волн соседних резонансных пиков $\Delta\lambda_{FSR}$ порядков m и $m + 1$ (область свободной дисперсии (англ. Free Spectral Range, FSR)) [7] определяется формулой

$$\Delta\lambda_{FSR} = \frac{\lambda^2}{n_g L}, \quad (4)$$

где $n_g = n_{eff}(\lambda) - \lambda \frac{\partial n_{eff}(\lambda)}{\partial \lambda}$ — групповой показатель преломления, равный 1,9178 для волновода шириной 1,0 мкм и $\lambda = 1,55$ мкм, $L = 2\pi R_r + 2L_e = 3171,6$ мкм, тогда $\Delta\lambda_{FSR} \approx 0,39$ нм.

Также могут быть оценены ширина одиночного резонансного пика на полувысоте (англ. Full Width at Half Maximum, FWHM), резкость оптического резонатора (F) — мера ширины резонанса по сравнению с областью свободной дисперсии и добротность (Q), определяющая ширину m -го резонанса [7]:

$$FWHM = \frac{\lambda^2}{\pi L_{opt} n_{eff}} \frac{1-t^2}{t}; \quad (5)$$

$$F = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{\pi t}{1-t^2}; \quad (6)$$

$$Q = \frac{n_{eff} L_{opt}}{\lambda} F = \frac{\pi n_{eff} L_{opt}}{\lambda} \frac{t}{1-t^2}. \quad (7)$$

Для рассчитываемого кольцевого резонатора: $FWHM = 0,025$ нм; $F = 15,6$; $Q = 0,5 \cdot 10^5$. Для высокочувствительных элементов датчиков физических величин требуются резонаторы с добротностью $10^5 \dots 10^6$. Рассчитанные характеристики совпадают со спектральными характеристиками кольцевого резонатора, смоделированного с помощью FreeFDTD (Optiwave) и FreeBPM.

Для минимизации сложности изготовления одномерного ФК на резонаторном контуре и снижения числа технологических шагов авторская группа прибегла к проектированию и созданию гофрированного оптического волновода, который является частным случаем одномерного ФК и представляет собой оптическую структуру с модуляцией эффективного показателя преломления в продольном направлении, вызванной периодической вариацией ширины волновода. Схематично гофрированный волновод представлен на рис. 2.

Период дифракции Λ рассчитывается по формуле [8]

$$\Lambda = \frac{M\lambda_{BG}}{2n_{eff}}, \quad M = 1, 2, 3, \dots, \quad (8)$$

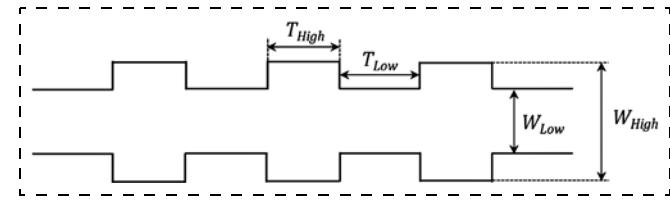


Рис. 2. Схематичный вид гофрированного волновода: W_{Low} — ширина сегмента T_{Low} , а W_{High} — ширина сегмента T_{High} ; T_{Low} и T_{High} — нормированные на Λ длины сегментов, $T_{Low} + T_{High} = 1$

Fig. 2. Schematic presentation of the corrugated waveguide: W_{Low} — width of segment T_{Low} , and W_{High} — width of segment T_{High} , T_{Low} and T_{High} — normalized on Λ lengths of segments, $T_{Low} + T_{High} = 1$

где M — порядок дифракции на гофрированном волноводе; λ_{BG} — рабочая длина волны в вакууме. Для фундаментальной моды оптического сигнала с $\lambda = 1,55$ мкм, распространяющегося по волноводу с шириной 1,0 мкм, $\Lambda = 0,4915M$.

В данной работе с учетом недостаточной точности процесса литографии в резонаторный контур для снижения потерь в контуре был интегрирован гофрированный волновод с $M = 3$, $\Lambda = 1,4745$, так как при $M = 1$ с заданной модуляцией показателя преломления гофрированный волновод представлял собой 100 %-ное отражающее зеркало, предотвращающее многократное распространение оптического излучения по резонаторному контуру, а также в ходе моделирования распространения излучения по нему наблюдались большие оптические потери.

Интеграция гофрированного волновода с кольцевым резонатором комплексно сказывается на спектральных характеристиках ИО элемента: во-первых, оптическое излучение, распространяющееся в резонансном контуре с длиной волны λ_{BG} многократно отражается от гофрированного волновода и меняет направление распространения, во-вторых, для $\lambda \neq \lambda_{BG}$ при интеграции гофрированного волновода в резонаторном контуре изменяется оптический путь за счет изменения n_{eff} и, соответственно, n_g контура, что сказывается на $\Delta\lambda_{FSR}$ [9, 10].

Оценка изменения $\Delta\lambda_{FSR}$ (здесь не приведена) показала, что $\Delta\lambda_{FSR}$ кольцевого резонатора, интегрированного с гофрированным волноводом, отличается от $\Delta\lambda_{FSR}$ кольцевого резонатора без гофрированного волновода в пределах погрешности математического расчета, а также в пределах погрешности проведенных в ходе данной работы измерений (0,02 нм).

Также проведена оценка функциональных характеристик кольцевого резонатора в качестве чувствительного элемента датчиков температуры. Температурная чувствительность кольцевого резонатора S [11]

$$S = \frac{d\lambda_m}{dT} = \frac{\lambda_m}{n_g} \left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \alpha_{Si_3N_4} \right), \quad (9)$$

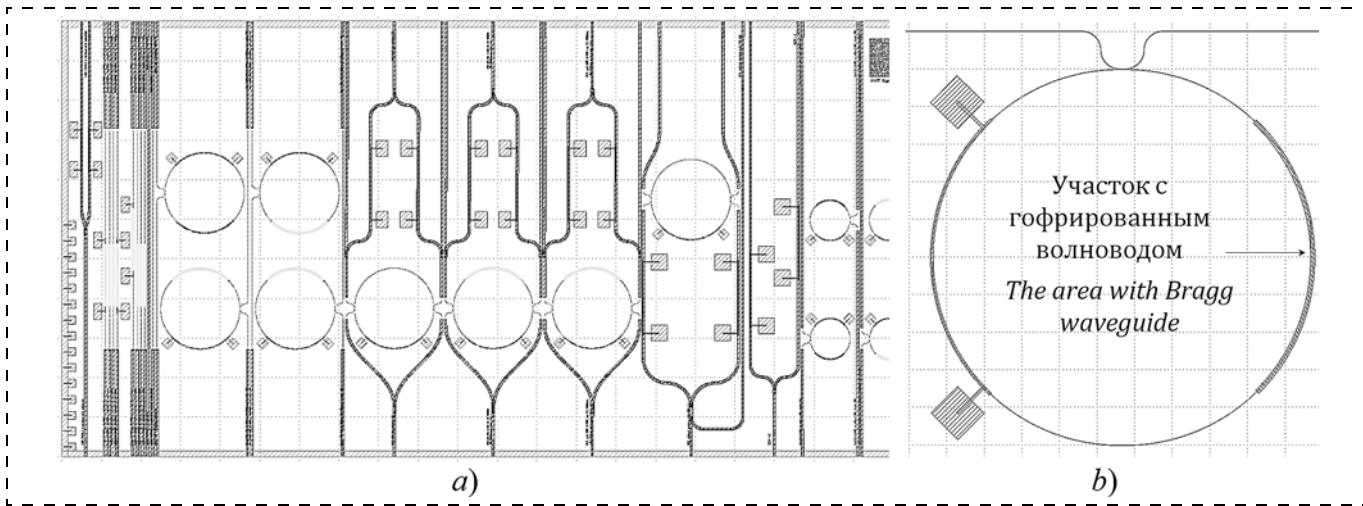


Рис. 3. Общий вид спроектированных интегрально-оптических элементов: *a* — набор тестовых элементов; *b* — вид кольцевого резонатора с частью резонаторного контура, выполненной в виде гофрированного волновода

Fig. 3. General view of the designed integral-optical elements: a — a set of testing elements; b — a corrugated (Bragg) waveguide of the resonator with a part of a resonator contour made in the form of a corrugated waveguide

где $\alpha_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ — коэффициент температурного расширения Si_3N_4 , а $\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} = 2,45 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [12] — термооптический коэффициент волновода. $S = 24 \text{ пм/K}^{-1}$ для проектируемого в данной работе резонатора.

На основе результатов моделирования и проведенных расчетов был спроектирован набор ИО тестовых элементов с вариацией заложенных параметров и, соответственно, топологии (рис. 3, *a*). На входе и выходе ИО элементов были спроектированы поляризующие элементы, в которых ТЕ мода распространялась с наименьшими оптическими потерями, ТМ мода имела потери более 40 дБ/см (подтверждено моделированием и экспериментально).

В ходе проектирования ИО элементов и моделирования распространения оптического излучения не принималось во внимание отклонение стехиометрии составов формируемых слоев SiO_2 и Si_3N_4 , рассчитанной топологии элементов от сформированной в ходе технологического цикла изготовления. Такие отклонения и вариации приводят к тому, что характеристики изготовленных ИО элементов несколько отличаются от характеристик, заложенных на этапе проектирования.

Отклонения стехиометрии формируемых слоев SiO_2 и Si_3N_4 авторская группа не исследовала. Отклонение топологии сформированных элементов наиболее явно было выявлено на участках гребенчатых

волноводов, в "окнах" покрытия из SiO_2 , созданных для испытаний интегрально-оптического элемента в качестве чувствительного элемента биосенсора: на изготовленных гофрированных волноводах наблюдается "сглаживание" модуляции ширины сегмента и, как следствие, снижение модуляции показателя преломления, что, хотя и является отклонением от спроектированной топологии элементов, выгодно для рабочих характеристик разрабатываемого высокочувствительного элемента, снижения оптических потерь рассеяния и улучшения его спектральной селективности.

Изображение изготовленного чипа с набором тестовых структур и снимок изготовленного гофрированного волновода со "сглаженной" модуляцией ширины волновода, полученный с помощью сканирующего электронного микроскопа, представлены на рис. 4. При проектировании волновода,

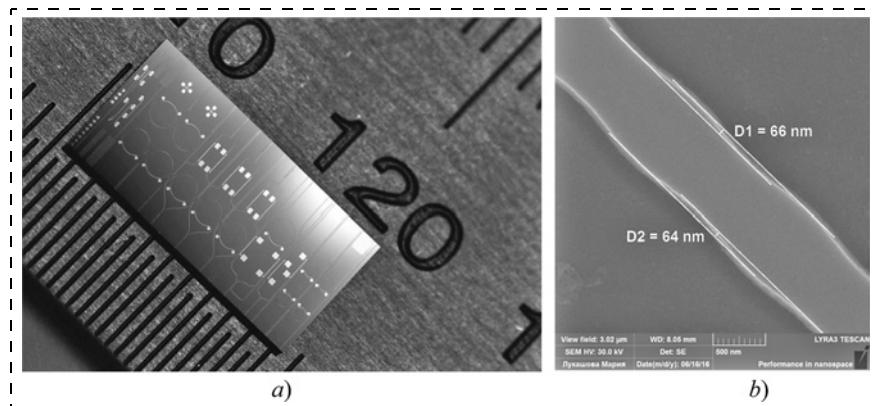


Рис. 4. Изображения изготовленных ИО структур: *a* — чип с набором тестовых элементов; *b* — гофрированного волновода, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (сумма размеров, отмеченных на изображении ($D_1 + D_2$), соответствует модуляции ширины волновода)

Fig. 4. Images of the manufactured IO structures: a — a chip with a set of the testing elements; b — corrugated waveguide, received by means of a scanning electron microscope (the sum of the sizes marked on the image ($D_1 + D_2$) corresponds to the modulation of the width of the waveguide)

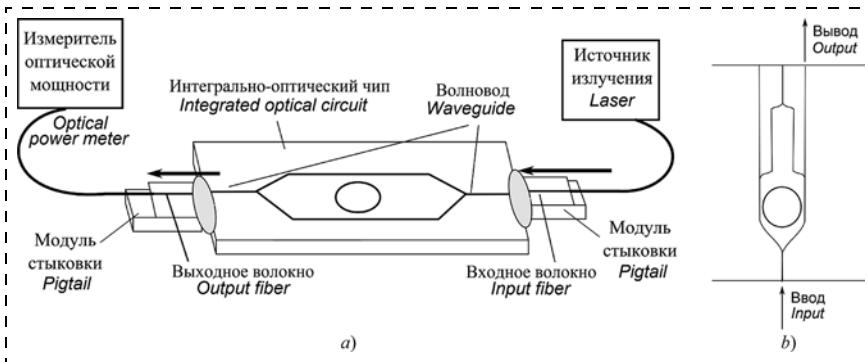


Рис. 5. Схемастыковки волноводов ИО чипа с оптическим волокном: а — на этапе организации ввода и вывода оптического излучения; б — при измерениях спектральных и функциональных характеристик кольцевого резонатора "на просвет"

Fig. 5. Scheme of joining of the waveguides of IO chip with an optical fiber: a — at the stage of organization of input and output of the optical radiation; b — during measurements of the spectral and functional characteristics of the ring resonator "at through port"

изображенного на рис. 4, б, закладывалась модуляция ширины волновода 150 нм ступенчатообразной формы, как на рис. 2, и была получена синусоидальная модуляция ширины с амплитудой 130 нм.

Исследования оптических и функциональных характеристик интегрально-оптического элемента

Для исследований оптических и функциональных характеристик созданных ИО элементов ввод и вывод излучения в оптические волноводы малых размеров осуществлялся с помощью линзованного волокна, представляющего собой утоненное оптическое волокно, имеющее на конце линзу, характеризующуюся диаметром поля моды выходящего оптического пучка 2,0...2,5 мкм.

Для проведения функциональных испытаний линзованное волокно крепилось к торцу чипа с тес-

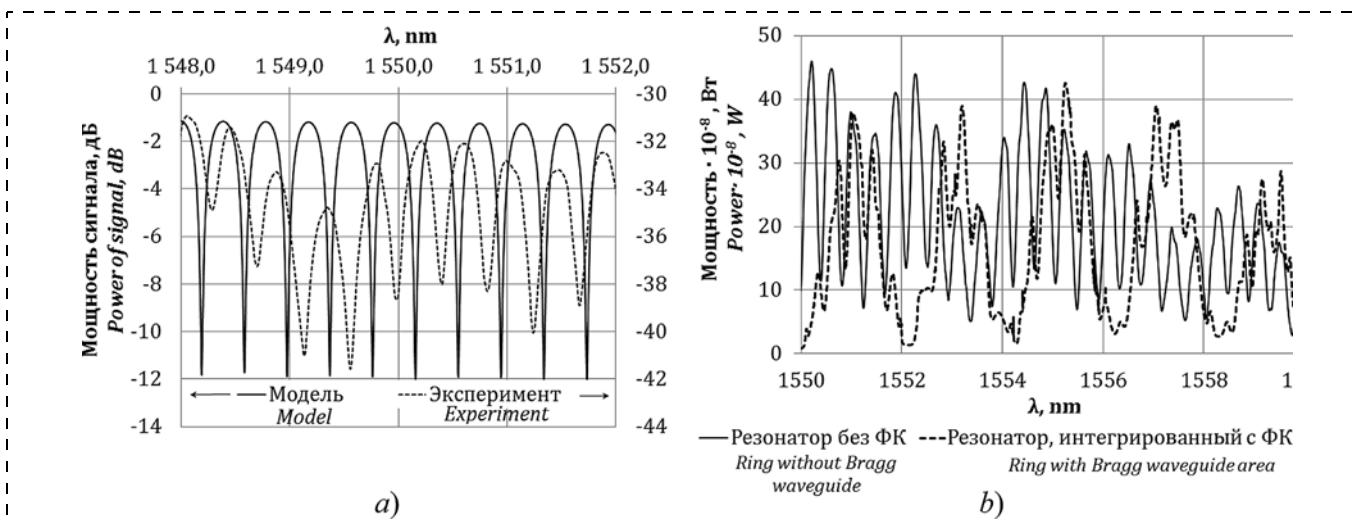


Рис. 6. Характерные спектральные характеристики резонаторов: а — сравнение экспериментальных результатов (мощность оптического сигнала указана на правой шкале) с результатами моделирования (мощность оптического сигнала указана на левой шкале); б — сравнение спектров резонаторов с интегрированным ФК и без него

Fig. 6. Typical spectral characteristics of the resonators: a — comparison of the experimental results (power of the optical signal is indicated on the right scale) with the results of modeling (power of the optical signal is indicated on the left scale); b — comparison of the spectra of the resonators with the integrated PC and without it

товыми элементами на УФ отверждаемый клей, создавалось устойчивое к механическим воздействиям соединение (рис. 5, а). Характерные потери при вводе и выводе оптического излучения составляли 10 дБ.

Для исследования спектральных характеристик кольцевых резонаторов на вход ИО элемента подавалось излучение с широкополосного источника лазерного излучения типа усилителя спонтанной эмиссии (УСЭМ, производство ПАО "ПНППК"), а выходной оптический сигнал снимался с помощью анализатора спектра Yokogawa AQ6370D (рис. 5, б).

Мощность оптического излучения использованного УСЭМ составляла 3,6 мВт, при этом характерные оптические потери на стыковку были 10 дБ.

На рис. 6, а представлена характерная спектральная характеристика кольцевого резонатора "на просвет". Для сравнения на этом же графике приведена спектральная характеристика резонатора, полученная на этапе проектирования; $\Delta\lambda_{FSR}$ изготовленного оптического резонатора составляет 0,42 нм. Отклонение $\Delta\lambda_{FSR}$ от смоделированных параметров может быть вызвано отклонением n_{eff} изготовленных волноводов от расчетных значений. Возможно, по этой же причине наблюдаются высокие оптические потери при прохождении ИО элемента.

При исследовании спектральных характеристик резонаторов с интегрированными гофрированными

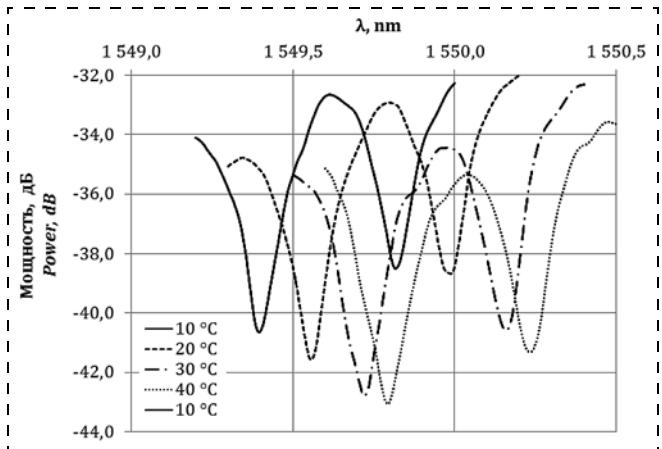


Рис. 7. Изменение положения резонансных пиков спектральных характеристик кольцевого резонатора без гофрированного волновода при изменении температуры вблизи $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$

Fig. 7. Variation of the position of the resonant peaks of the spectral characteristics of the ring resonator without the corrugated waveguide in case of a temperature change close to $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

ми волноводами в спектрах выявлена дополнительная спектрально селективная периодика (рис. 6, б) во всем исследованном диапазоне длин волн.

Для исследования функциональных характеристик спроектированных кольцевых резонаторов в качестве чувствительных элементов датчиков температуры состыкованный ИО чип помещали в термокамеру Espec MC-712. При температурах от 10 до 50 °С с шагом 5 °С снимали спектральные характеристики кольцевого резонатора по схеме "на просвет". На каждом шаге измерений запись спектра осуществлялась через 30 мин после изменения температуры камеры.

В данной работе исследовалась зависимость положения пика спектральной характеристики вблизи 1550 нм от температуры для кольцевых резонаторов с интегрированным гофрированным волноводом и без него (рис. 7). Смещение положения пика в зависимости от температуры вызвано изменением оптической длины резонаторного контура и $\Delta\lambda_{FSR}$.

Изменение положения резонансного пика интегрально-оптического резонатора без интегрированного гофрированного волновода составило 12...14 пм/°С; для резонаторов с интегрированными гофрированными волноводами — 29...32 пм/°С. Таким образом, экспериментально показано увеличение чувствительности кольцевого резонатора к изменению параметров окружающей системы при его интеграции с гофрированным волноводом. Вариация спектральных и функциональных характеристик от чипа к чипу и между элементами может быть объяснена вариацией параметра процесса изготовления в пределах вейфера.

Заключение

В данной работе впервые экспериментально продемонстрирована возможность улучшения функциональных характеристик ИО чувствительного элемента на основе кольцевого резонатора за счет его интеграции с одномерным ФК. Улучшение функциональных характеристик является следствием комплексного изменения оптических характеристик при интеграции двух резонансных ИО элементов, теоретически описанного в опубликованных ранее работах [4, 9, 10].

Улучшение функциональных характеристик разработанного ИО элемента к изменению состояния окружающей системы показано на примере увеличения его чувствительности к изменению температуры вследствие простоты конструкции и отсутствия необходимости разработки дополнительных способов интерпретации результатов измерений. Разработанные и изготовленные ИО элементы могут быть также использованы в качестве чувствительных элементов датчиков давления, вибрации, угла поворота и биосенсоров.

Температурная чувствительность изготовленных кольцевых резонаторов не совпадает с теоретически рассчитанной, а также изменение чувствительности ИО резонатора при его интеграции с гофрированным волноводом наблюдается только в 2 раза вместо нескольких тысяч раз (согласно расчетам, приведенным в цитируемом списке литературы). Данный факт может быть вызван несовершенством технологического процесса изготовления ИО элементов. Предполагается, что при усовершенствовании технологического процесса и учете вариации параметров технологического цикла в модели кольцевого резонатора могут быть спроектированы и изготовлены элементы с более высокой добротностью, а следовательно, и с улучшенными рабочими характеристиками интегрально-оптических чувствительных элементов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 02.G25.31.0113), а также при поддержке Министерства образования и науки Пермского края (С-26/004.02).

Список литературы

1. FBGS products: Temperature sensors. URL: <http://www.fbsgs.com/products/temperature-sensors/overview/> (дата обращения 24.10.2017).
2. Lu H., Sadani B. et al. Integrated temperature sensor based on an enhanced pyroelectric photonic crystal // Opt. Express. 2013. Vol. 21. P. 16311–16318.
3. Dell’Olio F., Tatoli T. Recent advances in miniaturized optical gyroscopes // J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public. 2014. Vol. 9. P. 14013.
4. Campanella C. E., Ciminelli C. et al. Integrated optics Bragg grating resonators with Q-factor gigascale. URL: <https://arxiv.org/abs/1307.2413> (дата обращения 12.10.2017).
5. Weber M. J. Handbook of Optical Materials. CRC press. 2002.
6. Yariv A. Coupled-mode theory for guided-wave optics // J. of Quantum Electronics. 1973. Vol. 9. P. 919–933.

7. **Rabus D. G.** Integrated ring resonators: The Compendium. Springer Series in Optical Sciences. 2007. Vol. 127. 258 p.
8. **Popov E.** Gratings: Theory and Numeric Applications. Institut Fresnel, CNRS, AMU. 2012. 431 p.
9. **Kang Y. M., Goddard L. L.** Semi-analytic modeling of microring resonators with distributed Bragg reflectors // 9th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices. 2009. P. 123–124.
10. **Kang Y. M., Arbabi A.** et al. A microring resonator with an integrated Bragg grating: a compact replacement for a sampled grating distributed Bragg reflector // Opt. Quantum Electron. 2009. Vol. 41. P. 689–697.
11. **Kim H. T., Yu M.** Cascaded ring resonator-based temperature sensor with simultaneously enhanced sensitivity and range // Opt Express. 2016. Vol. 24. N. 9. P. 260416.
12. **Arbabi A., Goddard L. L.** Measurements of the refractive indices and thermo-optic coefficients of Si_3N_4 and SiO_x using microring resonances // Optics letters. 2013. Vol. 38, N. 19. P. 3878–3881.

U. O. Salgaeva¹, Deputy Director, ulyanasalgaeva@yandex.ru, **A. R. Hasanshina**¹, Researcher, snicerslady@rambler.ru, **A. A. Kozlov**², Master, andreykozlov10031994@mail.ru, **A. A. Kondakov**¹, Researcher, kondakow90@gmail.com, **A. B. Volyncev**², D. Sc., Professor, Head of Chair, voland@psu.ru, **E. V. Moiseeva**³, Ph. D. in Electrical and Computer Engineering, Micro/Nano Technology Center, evmois@gmail.com,

¹ LLC "Innovation Company "Perm Nanotechnologies", Perm, 614990, Russian Federation,
² Perm State University, Perm, 614990, Russian Federation,
³ University of Louisville, Louisville, Kentucky, 40208, USA

Corresponding author:

Salgaeva Uliana O., Deputy Director, LLC "Innovation Company "Perm Nanotechnologies", Perm, 614990, Russian Federation, E-mail: ulyanasalgaeva@yandex.ru

Sensitive Element Based on the Integrated Optical Ring Resonator and One-dimensional Photonic Crystal for the Sensors of the Physical Values

Received on November 10, 2017
Accepted on December 04, 2017

To reduce the dimensions and expand the functional characteristics, the optical sensors of the physical values are being developed with the use of the integrated photonics technologies. For a higher accuracy of measurements, the sensing element can be designed on the basis of an array of the integrated optical (IO) elements, the optical characteristics of which depend on the physical-chemical parameters of the surrounding system. This paper describes the designing and specific features of manufacturing of the sensing element based on the integrated optical ring resonator with 1D photonic crystal (PC). For the first time experimental studies were carried out of the optical and functional characteristics of the manufactured element. The authors demonstrated experimentally that the ring resonator integrated with 1D photonic crystal had a two times better sensitivity to the temperature variation. Improvement of the manufacturing process is expected to increase significantly the operating characteristics of the sensing element.

Keywords: microring resonator, corrugated waveguide, integrated-optical sensors, temperature sensor

For citation:

Salgaeva U. O., Hasanshina A. R., Kozlov A. A., Kondakov A. A., Volyncev A. B., Moiseeva E. V. Sensitive Element Based on the Integrated Optical Ring Resonator and One-dimensional Photonic Crystal for the Sensors of the Physical Values, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 340–350.

DOI: 10.17587/nmst.20.340-350

Introduction

A ring resonator is an integrated-optical (IO) device, a closed waveguide (resonator contour), the input and output of the optical signal in which is carried out by means of the channel waveguides, optically coupled with a closed waveguide, which allows the energy of an electromagnetic wave to be transferred from the waveguides into the ring resonator, and back.

The ring resonators are applied in IO devices as filters, demultiplexers, sensitive elements of the sensors of the physical values and biosensors. The sensors based on IO sensitive elements have the advantages of the fiber-optical sensors (FOS) on the basis of the Bragg gratings (BG): they are stable in time, compact, electro-, explosive- and fireproof, resistant to the magnetic and electric fields. Besides, they allow us to monitor a set of the physical values (temperature, pressure, vibrations, rotation angle, chemical composition) "in a point" thanks to the small dimensions of the sensitive elements (from 300 nm in diameter) and possibility of their integration on a substrate with the area less than 1 cm², whereas the commercially available FOS allow us to measure only 1...2 physical values and have dimen-

sions from 5 cm. Compared with FOS, the sensors based on IO elements have higher sensitivity to variation of the physical values, thus, a fiber temperature sensor on the basis of BG has sensitivity to variation of temperature of 10...15 pm/°C [1], while the sensitivity of an element on the basis of IO ring resonator equals to 83 pm/°C and can be essentially increased due to a minor alteration of its design [2].

The operating principle of the physical values sensors based on the ring resonators is: during a variation of the state of the surrounding system, a change of the optical way of a signal occurs in a sensitive element due to a change of the effective refractive index in a closed optical waveguide or due to the other physical effects (Sagnac effect, for example), which eventually tells on the characteristics of the optical radiation, passing through or reflecting from a sensitive element.

In order to increase the accuracy and sensitivity of the sensors, the radius of a ring resonator is often increased or an array of the optically coupled resonators is integrated on one crystal, which means bigger overall dimensions of the sensitive elements. A promising method for increasing the accuracy and sensitivity of the sensors based on resonators is creation in its resonator contour of a one-di-

dimensional photon crystal (PC), characterized by a periodic variation of the refraction index in the direction of propagation of the radiation [3, 4]. Theoretical calculations show, that the accuracy of the angular speed sensor based on such kind of the resonators can reach $0.01^\circ/\text{h}$, and the Q-factor of the resonant contour is increased 1000 times [3, 4]. No experimental proof of the given calculations has been found in the sources. This can be explained by the fact that an experimental realization of such complex topologies demands attraction of hi-tech tool base, and realization of the manufacturing process in clean room facilities, which are not available for most of the research groups.

The given work describes the designing of the sensitive element of the sensors based on the ring optical resonator integrated with one-dimensional PC, on the basis of the results of the numerical and mathematical modeling of the integrated-optical waveguides with the use of the method of Finite Difference Time Domain (FDTD) and the Beam Propagation Method (BPM); the specific features of its manufacturing and the generated topology investigated by means of the scanning electronic microscope; the results of the research of the optical and functional characteristics as the sensitive element of the temperature sensor.

Designing and specific features of manufacturing of the sensitive element

In the process of the IO element designing the following work was done: modeling of propagation of the radiation and calculation of the topology of the main elements on the basis of the data about the used materials and the geometry of the cross-section of the waveguide with a compulsory account of the features of the technological manufacturing cycle. The IO elements described in given work were developed with account of the manufacturing technology based on the waveguide structures from the silicon nitride. The modeled profile of the cross-section of a raised waveguide is presented in fig. 1, a.

For designing of the topology of the ring resonator, the modeling was done of the channel waveguides and of the area of the optical coupling, and the resonator spectral characteristics were evaluated. The modeling of propagation of the optical radiation was carried out with application of the software products, in which the Maxwell equations and the material equations were solved with FDTD and BPM methods (for example, FreeFDTD and FreeBPM, OptiGrating from Optiwave, etc.).

For designing of the channel optical waveguide the parameters were set for the cross-section of the structure (fig. 1, a), as well as the indexes of refraction of the materials of the core of the waveguide (Si_3N_4) and the cladding (SiO_2) at $T = 20^\circ\text{C}$ in the range of the wavelengths of λ from 1.50 up to 1.60 μm , with a step of 0.1 μm . The indexes of the refraction of the materials of the waveguide and of the cladding depending on the wavelength (λ, nm) of the propagating radiation of TE mode are defined by the following formula [5]:

$$n_{\text{SiO}_2}(\lambda) = \sqrt{\frac{1.09877\lambda^2}{\lambda^2 - 92.4317^2} + 1}, \quad n_{\text{Si}_3\text{N}_4}(\lambda) = \sqrt{\frac{2.8936\lambda^2}{\lambda^2 - 139.67^2} + 1}.$$

For minimization of the possible deviations of the used model of a waveguide from the waveguide formed in a real technological cycle, the designers took into consideration the deviation of the side walls from the vertical position, the characteristic roughness of the side walls and the overetching. During several iterations of designing, manufacturing and measurements of the parameters of the structures it was revealed, that a waveguide with the width of 1 micrometer is a multimode one (according to the results of modeling), but the modes of the higher levels (except the fundamental one) dissipate on the roughnesses and heterogeneities of the side walls of the waveguides. All the calculations in the given work were done for the optical radiation of the TE mode.

During the modeling of the optical waveguide the characteristic effective indexes of refraction of the fundamental mode of n_{eff} were received for various values of λ and width of the waveguide W (for the further designing of one-dimensional PC) (see the table).

For creation of a sensitive IO element the optical resonators are used, in which the optical signal is propagated via a closed contour with minimal losses. For this purpose the designers set the minimal

possible values of the coupling coefficient K for transfer the optical irradiation from input to close waveguide (or from the resonator to output waveguide). Usually K is selected as equal to 0.01...0.15 depending on the characteristic optical losses in the closed waveguide and is calculated according to the following formula [6]:

$$K = \sin^2\left(\frac{\pi L_e}{2 L_b}\right), \quad (1)$$

where L_b — beating length, equal to

$$L_b = \frac{0.5\lambda}{n_{\text{eff},0} - n_{\text{eff},1}}, \quad (2)$$

where $n_{\text{eff},0}$ and $n_{\text{eff},1}$ — effective refraction indexes of the modes of the zero order (fundamental) and the first order, accordingly, propagating in the area of two closely located waveguides and calculated for the set wavelength and temperature. At the coupling length equal to $L_b/2$, $K \approx 1$, i.e. 100 % of the power (without account of the losses) of the optical radiation will be transferred from one waveguide into another, closely located one. At that, L_e — effective length of the area of the optical coupling — the length, at which two closely located waveguides are still optically coupled (the area of the optical coupling often exceeds the area of the straight waveguide L_s on the basis of which the element is designed) [6]. In order to ensure the required optical coupling and its minimal variation, during the designing of the topology, the X-shaped coupling area was set (fig. 1, b) with the minimal possible radiiuses of divergence of the waveguides the coupling area ($R = 50 \mu\text{m}$ at the characteristic losses for $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, equal to $5 \cdot 10^{-6} \text{ dB}$ per a turn of 90°).

During modeling of propagation of the TE mode with the wavelength $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ via two straight ridge waveguides with the width of $W = 1 \mu\text{m}$, located at the distance of $d = 0.6 \mu\text{m}$, the following results were received and calculated: $n_{\text{eff},0} = 1.58239$, $n_{\text{eff},1} = 1.56908$, and $L_b = 58.22 \mu\text{m}$. During designing the maximal coupling coefficient $K = 0.15$ was selected in order to guarantee the workability of the resonator and decrease the probability of 100 % dispersion of the introduced signal on the heterogeneities, therefore, $L_e \approx 15 \mu\text{m}$.

In order to ensure a fixed optical coupling with the input and output waveguides, a track resonator was designed with the length of the straight waveguides of 15 μm and the radiiuses of the connecting semicircles of 500 μm .

In our case the transmission coefficients $t(\lambda) = \sqrt{1 - K(\lambda)}$ of the optical radiation via the waveguide and coupling of the optical radiation $k(\lambda) = \sqrt{K(\lambda)}$ are equal to $t = 0.92$ and $k = 0.39$.

Estimation of the spectral characteristics of the resonator is implemented with account of the fact that only an optical signal with the wavelengths, which can fit an even number of times into the optical length of the closed waveguide, can propagate via the resonance contour [7], so $L_{\text{opt}} = m\lambda_m$, where λ_m is the resonant wavelength and m is a positive integral number (order). At the same time $L_{\text{opt}} = 2\pi R_r n_{\text{eff}}$, where R_r — radius of the ring resonator and n_{eff} — effective refraction index of the waveguide for the set temperature and wavelength. In order to make the optical signal propagate in the ring resonator, the following condition should be met:

$$2\pi R_r n_{\text{eff}} = m\lambda_m, \quad (3)$$

i.e. for the fixed radius of the resonator there is a variety of the wavelengths, meeting the resonance condition. The difference between the wavelengths of the neighboring resonant peaks of $\Delta\lambda_{FSR}$ of orders m and $m + 1$ (Free Spectral Range (FSR)) [7] is defined by the following formula:

$$\Delta\lambda_{FSR} = \frac{\lambda^2}{n_g L}, \quad (4)$$

where $n_g = n_{\text{eff}}(\lambda) - \lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}(\lambda)}{\partial \lambda}$ — group refraction index equal to 1.9178 for the waveguide with the width of 1.0 μm and $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $L = 2\pi R_r + 2L_e = 3171.6 \mu\text{m}$, and then $\Delta\lambda_{FSR} \approx 0.39 \text{ nm}$.

We can also estimate the width of a single resonant peak at the Full Width at Half Maximum, (FWHM), the finesse of the optical resonator (F) — a measure of the width of the resonance in compar-

ison with the area of a free dispersion, and the quality factor (Q), defining the width of the m -resonance [7].

$$FWHM = \frac{\lambda^2}{\pi L_{\text{opt}} n_{\text{eff}}} \frac{1-t^2}{t}; \quad (5)$$

$$F = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{\pi t}{1-t^2}; \quad (6)$$

$$Q = \frac{n_{\text{eff}} L_{\text{opt}}}{\lambda} F = \frac{\pi n_{\text{eff}} L_{\text{opt}}}{\lambda} \frac{t}{1-t^2}. \quad (7)$$

For the calculated ring resonator: $FWHM = 0.025$ nm; $F = 15.6$; and $Q = 0.5 \cdot 10^5$. The highly sensitive elements of the sensors of the physical values require the resonators with the Q-factor of $10^5 \dots 10^6$. The calculated characteristics match the spectral characteristics of the ring resonator simulated by means of FreeFDTD (Optiwave) and FreeBPM.

In order to minimize the complexity of manufacturing of the one-dimensional PC on a resonator contour and decrease the number of the technological steps, the authors' group did the design and created a corrugated optical waveguide, a particular case of the one-dimensional PC, that is, an optical structure with modulation of the effective refraction index in the longitudinal direction, caused by a periodic variation of the width of the waveguide. Schematically the corrugated waveguide is presented in fig. 2.

The diffraction period of Λ is calculated according to the formula [8]

$$\Lambda = \frac{M\lambda_{BG}}{2n_{\text{eff}}}, \quad M = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

where M — diffraction order on the corrugated waveguide, λ_{BG} — working wavelength in vacuum. For the fundamental mode of the optical signal with $\lambda = 1.55$ μm, propagating via a waveguide with the width of 1.0 μm, $\Lambda = 0.4915M$.

In the given work, taking into account the insufficient accuracy of the process of lithography in the resonator contour, in order to reduce the losses in the contour, a corrugated waveguide was integrated with $M = 3$, $\Lambda = 1.4745$. As at $M = 1$ with the set modulation of the refraction index, the corrugated waveguide was a 100 % reflecting mirror preventing a repeated propagation of the optical radiation via the resonator contour, and during the modeling of propagation of radiation via it big optical losses were also observed.

Integration of the corrugated waveguide with the ring resonator has a complex affect on the spectral characteristics of the IO element: firstly, the optical radiation propagating in the resonant contour with the wavelength of λ_{BG} reflects repeatedly from the corrugated waveguide and changes the direction of its propagation, in case of corrugated waveguide in the ring resonator, for $\lambda \neq \lambda_{BG}$ the optical way changes due to variation of n_{eff} , correspondingly, of n_g contour, which tells on $\Delta\lambda_{FSR}$ [9, 10].

An estimation of the change of $\Delta\lambda_{FSR}$ (not presented here) demonstrated, that $\Delta\lambda_{FSR}$ of the ring resonator integrated with the corrugated waveguide, differed from $\Delta\lambda_{FSR}$ of the ring resonator without a corrugated waveguide within the limit of an error of a mathematical calculation, and also within an error of the measurements taken during the given work (0.02 nm).

Also an estimation was done of the functional characteristics of the ring resonator as a sensitive element of the temperature sensors. The temperature sensitivity of the ring resonator S [11]:

$$S = \frac{d\lambda_m}{dT} = \frac{\lambda_m}{n_g} \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + n_{\text{eff}} \alpha_{\text{Si}_3\text{N}_4} \right), \quad (9)$$

where $\alpha_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 3.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ — coefficient of thermal expansion of Si_3N_4 , while $\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} = 2.45 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [12] — thermo-optical coefficient of the waveguide. $S = 24 \text{ pm/K}^{-1}$ for the resonator, which is being designed in the given work.

On the basis of the results of modeling and of the implemented calculations a set of IO testing elements with a variation of the parameters set in it and, accordingly, topology (fig. 3, a) were designed. At the input and output of the IO elements the polarizing elements

were designed, in which TE mode propagated with the minimal optical losses, while TM mode had losses over 40 dB/cm (confirmed by the experiments and modeling).

During designing of the IO elements and modeling of propagation of the optical radiation, the deviation of the stoichiometry of the compositions of the formed layers of SiO_2 and Si_3N_4 , of the calculated topology of the elements from the one generated during the manufacturing work cycle, were not taken into consideration. Such deviations and variations lead to the fact that the characteristics of the manufactured IO elements somewhat differ from the characteristics, set at the designing stage.

The deviations of the stoichiometry formed by SiO_2 and Si_3N_4 layers were not investigated by authors' group. The deviation of the topology of the generated elements was most obviously revealed on the sites of the ridge waveguides, in the "windows" of SiO_2 cladding, created for testing of the integrated-optical element as a sensitive element of the biosensor control: on the manufactured corrugated waveguides "a smoothing" of modulation of the segment's width is observed, and, as consequence, a decrease of the modulation of the refraction index, which although is a deviation from the designed topology of the elements, nevertheless is favorable for the operating characteristics of the developed highly sensitive element, reduction of the optical losses of dispersion and improvement of its spectral selectivity.

An image of the manufactured chip with a set of the testing structures and a picture of the manufactured corrugated waveguide with the "smoothed" modulation of the width of the waveguide, received by means of a scanning electronic microscope, are presented in fig. 4. In the design of the waveguide presented in fig. 4, b, the set modulation of the width of the waveguide of 150 nm was of a stepped form as in fig. 2, and the sinusoidal modulation of the width with the amplitude of 130 nm was received.

Research of the optical and functional characteristics of the integrated-optical element

For the research of the optical and functional characteristics of the created IO elements, the input and output of the radiation in the optical waveguides of small dimensions was carried out by means of a lensed fiber, which was a thinned optical fiber with a lens on its end, characterized by the diameter of the mode field of the outgoing optical beam of $2.0 \dots 2.5$ μm.

For carrying out of the functional tests, the lensed fiber was fastened to the butt end of a chip with the testing elements by an UV cured glue, and thus a compound was created resistant to the mechanical influences (fig. 5, a). The characteristic losses at the input and output of the optical radiation were equal to 10 dB.

For research of the spectral characteristics of the ring resonators, to the input of IO element a radiation was supplied from a broadband source of a laser radiation of the type of an amplifier of a spontaneous emission (ASE from PAO PNPPK), while the output optical signal was taken by means of Yokogawa AQ6370D spectrum analyzer (fig. 5, b). The power of the optical radiation of the used ASE was 3.6 mW, at that, the characteristic optical losses on joining were 10 dB.

Fig. 6, a presents the typical spectral characteristics of the ring resonator "at the trough port". For the comparison purpose, the same diagram presents the spectral characteristics of the resonator received at the stage of designing: $\Delta\lambda_{FSR}$ of the manufactured optical resonator equals to 0.42 nm. The deviation of $\Delta\lambda_{FSR}$ from the simulated parameters can be caused a deviation of n_{eff} of the manufactured waveguides from the calculated values. Probably, the high optical losses are observed during passage of IO element due to the same reason.

During research of the spectral characteristics of the resonators with the integrated corrugated waveguides, an additional spectral-selective periodicity was revealed (fig. 6, b) in the spectra, in all the investigated range of the wavelengths.

For research of the functional characteristics of the designed ring resonators as the sensitive elements of the temperature sensors, a butt-coupled IO chip was placed into Espec MC-712 heat chamber. At temperatures from 10 up to 50 °C with a step of 5 °C the spectral characteristics of the ring resonator at the through port were recorded. At each step the measurements of the spectrum were recorded in 30 min. after a change of the temperature in the chamber.

The given work presents the research of the dependence of the position of the peak of the spectral characteristics near 1550 nm on the temperature for the ring resonators with the integrated corrugated waveguide and without it (fig. 7). Displacement of the position of the peak depending on the temperature was caused by a change of the optical length of the resonator contour and $\Delta\lambda_{FSR}$.

The variation of the position of the resonant peak of the integrated-optical resonator without the integrated corrugated waveguide was 12...14 pm/ $^{\circ}\text{C}$; for the resonators with the integrated corrugated waveguides it was 29...32 pm/ $^{\circ}\text{C}$. Thus, an increase of the sensitivity of the ring resonator to variation of the parameters of the surrounding system during its integration with the corrugated waveguide was demonstrated experimentally. The variation of the spectral and functional characteristics from a chip to chip and between the elements can be explained by a variation of the manufacturing process parameter within the limits of a wafer.

Conclusion

The given work for the first time demonstrated experimentally a possibility of improvement of the functional characteristics of IO sensitive element based on a ring resonator due to its integration with a one-dimensional PC. The improvement of the functional characteristics is a consequence of a complex change of the optical characteristics due to integration of two resonant IO elements, theoretically described in the works published earlier [4, 9, 10].

Improvement of the functional characteristics of the developed IO element to variation of the state of the surrounding system is shown on the example of an increase of its sensitivity to the variation of temperature due to simplicity of its design and absence of the necessity for development of additional ways for interpretation of the results of measurements. The developed and manufactured IO elements can also be used as the sensitive elements of the sensors of pressure, vibration, turning angle and biosensors.

The temperature sensitivity of the manufactured ring resonators does not match with the theoretically calculated data, and, besides, a change of sensitivity of IO of the resonator in case of its integration with the corrugated waveguide is only two times, instead of several thousand times (according to the calculations presented in the quoted list of literature). The given fact can be caused by imperfection of the technological manufacturing process of IO elements. It is expected, that due to improvement of the technological process and with account of the variation of the parameters of the technological cycle in the model of the ring resonator, the elements with higher Q-factor,

and consequently, improved characteristics of the integrated-optical sensitive elements can be designed and manufactured.

The work was done with support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project № 02.G25.31.0113), and also with support of the Ministry of Education and Science of Perm Region (S-26/004.02).

References

1. FBGS products: Temperature sensors, URL: <http://www.fbsgs.com/products/temperature-sensors/overview/> (date of review 24.10.2017).
2. Lu H., Sadani B. et al. Integrated temperature sensor based on an enhanced pyroelectric photonic crystal, *Opt. Express*, 2013, vol. 21, pp. 16311–16318.
3. Dell’Olio F., Tatoli T. Recent advances in miniaturized optical gyroscopes, *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public*, 2014, vol. 9, pp. 14013.
4. Campanella C. E., Ciminelli C. et al. *Integrated optics Bragg grating resonators with Q-factor gigascale*, URL: <https://arxiv.org/abs/1307.2413> (date of review 12.10.2017).
5. Weber M. J. *Handbook of Optical Materials*, CRC press, 2002.
6. Yariv A. Coupled-mode theory for guided-wave optics, *J. of Quantum Electronics*, 1973, vol. 9, pp. 919–933.
7. Rabus D. G. Integrated ring resonators: The Compendium, *Springer Series in Optical Sciences*, 2007, vol. 127, 258 p.
8. Popov E. *Gratings: Theory and Numeric Applications*, Institut Fresnel, CNRS, AMU, 2012, 431 p.
9. Kang Y. M., Goddard L. L. *Semi-analytic modeling of micro-ring resonators with distributed Bragg reflectors*, 9th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, 2009, pp. 123–124.
10. Kang Y. M., Arbabi A. et al. A microring resonator with an integrated Bragg grating: a compact replacement for a sampled grating distributed Bragg reflector, *Opt. Quantum Electron*, 2009, vol. 41, pp. 689–697.
11. Kim H. T., Yu M. Cascaded ring resonator-based temperature sensor with simultaneously enhanced sensitivity and range, *Opt Express*, 2016, vol. 24, no. 9, P. 260416.
12. Arbabi A., Goddard L. L. Measurements of the refractive indices and thermo-optic coefficients of Si_3N_4 and SiO_x using micro-ring resonances, *Optics letters*, 2013, vol. 38, no. 19, pp. 3878–3881.

УДК 537.6

DOI: 10.17587/nmst.20.350-355

В. Н. Серов, канд. техн. наук, доц., e-mail: serov.v.n.1945@mail.ru, **Л. Ю. Фетисов**, канд. физ.-мат. наук, доц., **Ю. К. Фетисов**, д-р физ.-мат. наук, проф., **Д. В. Чашин**, канд. техн. наук, вед. инженер, Московский технологический университет (МИРЭА), Москва

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ПОСТОЯННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ КОМПЕНСАЦИОННОГО ТИПА С РАСШИРЕНИМ ЛИНЕЙНЫМ ДИАПАЗОНОМ

Поступила в редакцию 08.12.2017

Описан датчик постоянных магнитных полей компенсационного типа, использующий магнитоэлектрический эффект в планарной композитной структуре ферромагнетик – пьезоэлектрик. Магнитоэлектрический эффект в структуре возникает в результате комбинации магнитострикции ферромагнитного слоя и пьезоэффекта в пьезоэлектрическом слое. Датчик содержит композитную структуру, предварительный усилитель, генератор переменного напряжения и синхронный детектор и использует зависимость амплитуды напряжения, генерируемого структурой, помещенной в возбуждающее переменное магнитное поле и измеряемое постоянное магнитное поле, от значения постоянного поля. Показано, что введение в схему датчика цепи отрицательной обратной связи, содержащей усилитель постоянного напряжения и компенсирующую катушку, приводит к линеаризации характеристики и расширению диапазона рабочих полей датчика. Ширина рабочего диапазона полей датчика зависит от коэффициента обратной связи схемы и увеличивается в десятки раз.

Изготовлен макет датчика на основе планарной структуры Metglas — пьезоволоконный композит — Metglas, который обладает чувствительностью 27 мВ/Э и позволяет регистрировать постоянные магнитные поля в диапазоне от ~0,2 до ~70 Э.

Ключевые слова: датчик магнитного поля, магнитоэлектрический эффект, магнитострикция, пьезоэффект, компенсационная схема

Введение

Датчики магнитных полей, использующие магнитоэлектрический (МЭ) эффект в композитных планарных структурах ферромагнетик — пьезоэлектрик (ФМ—ПЭ), интенсивно исследуют в последние годы в связи с перспективами применений в энергетике, на транспорте, в системах навигации, в геофизике и медицине [1—8].

Принцип работы МЭ датчиков следующий: при воздействии на структуру переменного магнитного поля $h(f)$ с частотой f магнитострикция вызывает деформацию ФМ-слоя, эта деформация передается ПЭ-слою и между электродами последнего вследствие пьезоэлектрического эффекта генерируется переменное напряжение $u(f)$. Амплитуда напряжения u пропорциональна полю h и кроме того зависит от значения постоянного поля H , приложенного к структуре. Поэтому МЭ эффект в композитных структурах может быть применен для разработки датчиков как переменных, так и постоянных полей.

Созданные к настоящему времени МЭ датчики позволяют измерять постоянные магнитные поля H значением от $\sim 10^{-3}$ до $\sim 2\ldots 100$ Э [9—12]. Значение минимального регистрируемого поля определяется в основном магнитными шумами ФМ-слоя [13], а верхняя граница рабочего диапазона датчиков ограничена полем насыщения материала ФМ-слоя структуры [14]. Зависимость выходного сигнала МЭ датчиков от H определяется видом полевой зависимости магнитострикции $\lambda(H)$ ФМ-слоя и, как правило, имеет нелинейный вид [15]. В связи с этим весьма актуальной задачей является разработка методов линеаризации характеристик МЭ датчиков постоянных полей и расширения их рабочего диапазона.

В настоящей работе впервые изготовлен и исследован МЭ датчик постоянных магнитных полей компенсационного типа. Показано, что введение цепи отрицательной обратной связи, содержащей усилитель постоянного напряжения и компенсирующую катушку, приводит к линеаризации характеристики и расширению в десятки раз диапазона рабочих полей датчика.

Чувствительный элемент датчика

Конструкция чувствительного элемента датчика на основе МЭ структуры схематически показана на

рис. 1 (см. третью сторону обложки). Он содержит два ФМ-слоя из магнитострикционного аморфного сплава состава FeBSiC (Metglas 2605S3A Magnetic Alloy) [16] размерами 10×40 мм и толщиной 30 мкм, между которыми расположен ПЭ-слой. Магнитострикция ФМ-слоев достигает насыщения $\lambda_S \approx 22 \cdot 10^{-6}$ в поле $H_S \approx 100$ Э, а пьезомагнитный коэффициент, рассчитанный по измеренной зависимости $\lambda(H)$, имеет максимум $q = \partial\lambda / \partial H \approx \approx 3 \cdot 10^{-6}$ Э $^{-1}$ при поле $H_1 \approx 10$ Э. В качестве ПЭ-слоя использовали пьезоволоконный композит (ПВК) (M4010-P1, Smart Materials) [17] размерами 10×40 мм и толщиной 0,3 мм. ПВК содержит набор волокон из цирконата-титаната свинца (PZT-волокна), расположенных между встречно-штыревыми преобразователями с периодом 1 мм. Емкость и сопротивление ПВК на частоте 1 кГц равнялись 0,96 нФ и 93 кОм соответственно. PZT-волокна поляризованы в продольном направлении, и при деформации работает пьезомодуль $d_{33} = 460$ пК/Н. Применение ПВК вместо поперечно поляризованной PZT-пластины позволяет в несколько раз повысить выходное напряжение чувствительного элемента. Слои структуры были соединены с помощью клея "Loctite". На структуру плотно намотана возбуждающая катушка сопротивлением 6,7 Ом. При пропускании через катушку переменного тока с частотой f_0 она создает в ФМ-слоях возбуждающее магнитное поле $h(f)$ с амплитудой до 1 Э. Измеряемое постоянное магнитное поле H прикладывается вдоль оси структуры. При воздействии на МЭ структуру переменного поля $h(f)$ и постоянного поля H она, вследствие МЭ эффекта, генерирует напряжение $u(f)$.

На рис. 2 приведена измеренная зависимость напряжения u , генерируемого чувствительным элементом датчика, от постоянного поля H при возбуждающем поле с частотой $f = 1$ кГц и амплитудой $h = 1$ Э. Зависимость имеет типичный для МЭ структур вид [18]: напряжение u вначале примерно линейно растет с увеличением H , достигает максимума при поле $H_1 \approx 10$ Э, соответствующем максимуму пьезомагнитного коэффициента $q = \partial\lambda / \partial H$, а затем плавно стремится к нулю при насыщении магнитострикции λ ФМ-слоя. На рис. 2 видно, что для измерения H можно использовать только начальный участок кривой в области магнитных полей $0 < H < H_m$, где напряжение u однозначно зависит от H . Для описанного чувствительного элемента

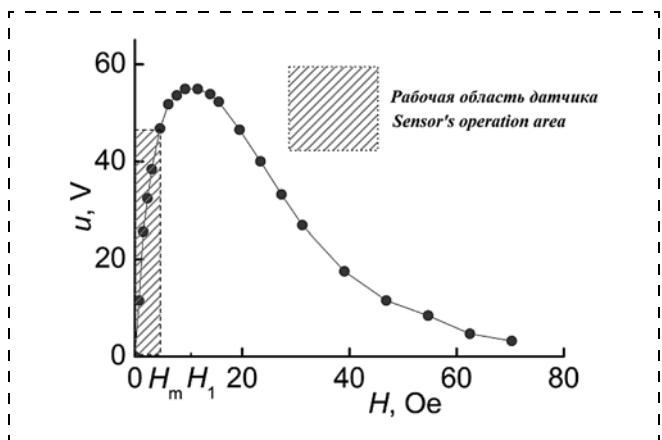


Рис. 2. Зависимость амплитуды напряжения, генерируемого МЭ элементом, от постоянного магнитного поля H

Fig. 2. Dependence of the amplitude of the voltage generated by the ME element on the constant magnetic field H

верхний диапазон измеряемых полей не превышал $H_m \approx 5$ Э. При этом даже в указанном диапазоне полей значение u нелинейно зависит от поля H , что требует применения корректирующих схем для линеаризации характеристик МЭ датчика.

Схема датчика полей компенсационного типа

Для линеаризации характеристики чувствительного МЭ элемента использована схема компенсационного типа [19]. Схема датчика показана на рис. 3. Он содержит: чувствительный элемент на основе структуры Metglas—ПВК—Metglas; предварительный усилитель; синхронный детектор; генератор переменного напряжения; усилитель постоянного напряжения и компенсирующую катушку, включенные в цепь отрицательной обратной связи. Малошумящий усилитель с входным сопротивлением 1 МОм на основе интегральной микросхемы AD620 обеспечивает необходимое согласование с ПВК и дополнительное усиление сигнала в $K_1 = 3$ раза. Усиленный сигнал подается на синхронный детектор, разработанный на основе микросхемы AD630. Одновременно на синхронный детектор поступает гармонический сигнал с частотой 1 кГц от генератора на микросхеме AD8656. Генератор подключен также к возбуждающей катушке чувствительного элемента, которая создает возбуждающее магнитное поле. Поскольку МЭ структура работает на частоте, далекой от частоты ее собственного механического резонанса, сдвиг фаз между входным и опорным сигналами синхронного детектора отсутствует [20]. В этом случае детектор осуществляет двухполупериодное выпрямление входного сигнала. Фильтр низких частот, стоящий на выходе синхронного детектора, выделяет постоянную составляющую сигнала U , пропорциональ-

ную амплитуде сигнала u с чувствительного элемента. Суммарный коэффициент усиления по напряжению синхронного детектора и фильтра равен $K_2 = 12,7$.

Цепь отрицательной обратной связи датчика формируют ключ K , усилитель постоянного напряжения и компенсирующая катушка. Усилитель на микросхеме OPA551 повышает постоянное напряжение U еще в $K_3 = 10$ раз и обеспечивает ток в катушке до 200 мА. Катушка с сопротивлением $R_0 = 105$ Ом и индуктивностью 185 мГн включается таким образом, что создает в месте расположения чувствительного элемента постоянное поле H_C напряженностью до ~72 Э, направленное навстречу измеряемому полю H . Коэффициент обратной связи схемы $G = R_0/(R + R_0)$ регулировался в диапазоне от нуля до единицы изменением сопротивления R (на рис. 3 не показано), включенного последовательно с катушкой. Отрицательная обратная связь приводит к тому, что чувствительный элемент при любых значениях измеряемого поля работает в области малых полей $H - H_C \ll H$, что и позволяет линеаризовать характеристику датчика.

Характеристики датчика

На рис. 4 (см. третью сторону обложки) приведены измеренные зависимости напряжения U на выходе датчика от измеряемого магнитного поля H при различных коэффициентах обратной связи. Кривая для $G = 0$ соответствует отсутствию обратной связи в схеме и полностью повторяет форму полевой зависимости напряжения $u(H)$, генерируемого МЭ структурой (см. рис. 2). Видно, что с

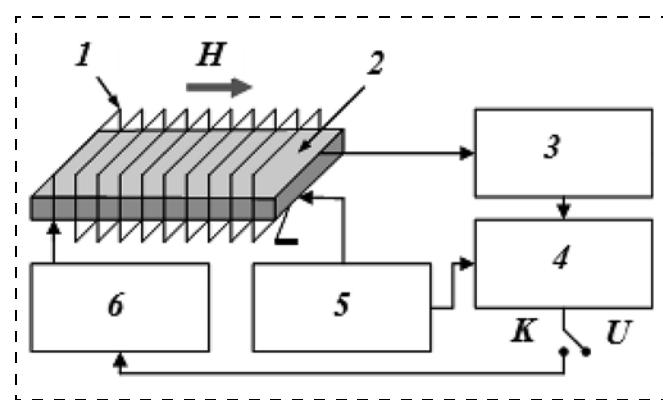


Рис. 3. Схема МЭ датчика постоянных магнитных полей компенсационного типа: 1 — компенсирующая катушка; 2 — чувствительный элемент; 3 — предварительный усилитель; 4 — синхронный детектор; 5 — генератор переменного напряжения; 6 — усилитель постоянного напряжения

Fig. 3. Diagram of the ME sensor of the permanent magnetic fields of the compensation type: 1 — compensating coil; 2 — sensing element; 3 — preliminary amplifier; 4 — synchronous detector; 5 — alternating voltage generator; 6 — constant voltage amplifier

увеличением коэффициента обратной связи G максимум кривых сдвигается в область более высоких полей и начальный линейный участок расширяется.

Для $G = 1$ зависимость выходного напряжения датчика от поля H линейна во всем диапазоне магнитных полей 0...72 Э. С увеличением коэффициента обратной связи G от нуля до единицы чувствительность датчика (определенная по наклону штриховых кривых на рис. 4) уменьшается от $U/H \approx 620$ до 27 мВ/Э, т. е. примерно в 23 раза. При этом ширина диапазона полей линейной зависимости выходного напряжения от измеряемого поля расширяется от ~1,5 до 72 Э, т. е. примерно в 50 раз. Амплитуда шумового напряжения на выходе датчика с наибольшим линейным диапазоном составляла ~5 мВ. Принимая во внимание чувствительность датчика, получаем, что он позволяет регистрировать минимальные поля до $H_{\min} \approx 0,2$ Э.

Заключение

Экспериментально продемонстрировано расширение линейного диапазона датчиков постоянных магнитных полей, использующих МЭ эффект в композитных структурах, за счет применения компенсационной схемы. В датчике, содержащем чувствительный элемент на основе структуры Metglas—ПВК—Metglas, синхронный детектор, усилитель постоянного напряжения и компенсирующую катушку в цепи отрицательной обратной связи, достигнуто расширение диапазона линейности с ~1,5 до 72 Э, т. е. примерно в 50 раз. Расширение диапазона линейности сопровождается уменьшением чувствительности датчика, что можно компенсировать повышением коэффициентов усиления электронных компонентов схемы. Диапазон линейности МЭ датчиков описанного типа может быть еще расширен в область высоких полей за счет использования ферромагнитных материалов с более высоким полем насыщения и оптимизации конструкции компенсирующей катушки.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзадания по проекту № 8.1183.2017/ПЧ.

Список литературы

1. Gutierrez J., Lasheras A., Matrins P. et al. Metallic glass/PVDF magnetoelectric laminates for resonant sensors and actuators: A review // Sensors. 2017. Vol. 17. doi.org/10.3390/s17061251.
2. Wang G., Li J., Viehland D. Magnetoelectrics for magnetic sensors applications: status, challenges and perspectives // Materials today. 2014. Vol. 17. P. 269—276.
3. Paluszek M., Avirovik D., Zhou Y., Priya S. Magnetoelectric composites for medical applications // In Composite magnetoelectrics. Materials, structures and applications / Eds. G. Srinivasan, S. Priya, N. Sun. Elsevier. 2015. P. 297—327.
4. Palneedi H., Annapureddy V., Priya S., Ryu J. Status and perspectives of multiferroic magnetoelectric composite materials and applications // Actuators. 2016. Vol. 5. P. 1—31.
5. Jahns R., Knochel R., Greve H., Woltermann E., Lage E. Quandt E. Magnetoelectric sensors for biomagnetic measurements // 2011 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications. May 30—31, 2011. Bari, Italy, 2011. P. 107—110.
6. Бурдин Д. А., Фетисов Ю. К., Чашин Д. В., Экономов Н. А. Датчик магнитных полей гетеродинного типа на основе нелинейного магнитоэлектрического эффекта // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 2. С. 39—42.
7. Федулов Ф. А., Фетисов Л. Ю., Фетисов Ю. К., Маковкин С. А. Датчик магнитных полей на основе магнитоэлектрического эффекта удвоения частоты в структуре ферромагнетик-пьеозелектрик // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 6. С. 59—62.
8. Фетисов Л. Ю., Серов В. Н., Быковцев Ю. А., Маковкин С. А., Фетисов Ю. К., Казакевич И. С. Пороговый датчик магнитных полей на основе автогенератора с магнитоэлектрическим резонатором // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 3. С. 187—192.
9. Nan T., Hui Y., Rinaldi M., Sun N. Self-biased 215 MHz magnetoelectric NEMS resonator for ultra-sensitive DC magnetic field detection // Scientific reports. 2013. Article No 1985.
10. Серов В. Н., Фетисов Л. Ю., Фетисов Ю. К., Шестаков Е. И. Высокочувствительный магнитометр на основе магнитоэлектрического датчика // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. С. 24—37.
11. Burdin D., Chashin D., Ekonomov N. et al. Magnetic field sensing based on the nonlinear magnetoelectric effect in magnetic heterostructures // J. Phys. D. Appl. Phys. 2016. Vol. 49. P. 375002.
12. Burdin D. A., Chashin D. V., Ekonomov N. A., Fetisov Y. K., Stashkevich A. A. High-sensitivity DC field magnetometer using nonlinear resonant magnetoelectric effect // J. Magn. Mag. Mater. 2016. V. 405. P. 244—248.
13. Jahns R., Greve H., Woltermann E., Quandt E., Knochel R. Noise performance of magnetometers with resonant thin-film magnetoelectric sensors // IEEE Trans. on Instr. & Measur. 2011. Vol. 60. P. 2995—3001.
14. Vopsaroiu M., Cain M. G., Sreenivasulu G., Srinivasan G., Balbashov A. M. Multiferroic composite for combine detection of static and alternating magnetic fields // Materials Letters. 2012. Vol. 66. P. 282—284.
15. Srinivasan G. Magnetoelectric composites // Annu. Rev. Mater. Res. 2010. V. 40. P. 153—178.
16. <https://metglas.com/magnetic-materials/>
17. <https://www.smart-material.com/MFC-product-main.html>
18. Chashin D. V., Fetisov Y. K., Tafintseva E. V., Srinivasan G. Magnetoelectric effects in layered samples of lead zirconium titanate and nickel films // Solid State Communications. 2008. Vol. 148. P. 55—58.
19. Данилов А. Современные промышленные датчики тока // Современная электроника. 2004. Вып. 10. С. 26—35.
20. Fetisov L. Y., Serov V. N., Chashin D. V., Makovkin S. A., Fetisov Y. K., Srinivasan G., Viehland D. A magnetoelectric sensor of threshold DC magnetic fields // J. Appl. Phys. 2017. Vol. 121. P. 154503.

V. N. Serov, Ph. D., Associate Professor, e-mail: serov.v.n.1945@mail.ru, **L. Yu. Fetisov**, Ph. D., Associate Professor, **Yu. K. Fetisov**, D. Sc., Professor, **D. V. Chashin**, Ph. D., Leading Engineer, Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author:

Serov Vladimir N., Ph. D., Associate Professor, Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: serov.v.n.1945@mail.ru

Magnetoelectric Compensation Type Sensor of Permanent Magnetic Fields with Extended Linear Range

Received on December 08, 2017
Accepted December 25, 2017

A compensation type sensor of permanent magnetic fields is described, using a magnetoelectric effect in the planar composite ferromagnetic-piezoelectric structure. The magnetoelectric effect in the structure arises due to combination of the magnetostriction of the ferromagnetic layer and the piezoelectric effect in the piezoelectric layer. The sensor contains a composite structure, a preamplifier, an alternating voltage generator, and a lock-in amplifier. The sensor uses dependence of the amplitude of the voltage generated by the structure placed in the excitation magnetic field and the measured permanent magnetic field on the value of the permanent field.

It is shown that introduction of a negative feedback circuit incorporating a constant voltage amplifier and a compensating coil into the circuit of the sensor leads to the linearization of its characteristics and widening of its magnetic field operation region. The width of the operation range of the sensor depends on the feedback factor of the circuit and is increased by tens of times. A prototype of the sensor based on the planar metglas — piezo-fiber composite — metglas structure, has a sensitivity of 27 mV/E and allows detection of permanent magnetic fields in the range from ~0.2 E to ~70 E.

Keywords: magnetic field sensor, magnetoelectric effect, magnetostriction, piezoelectricity, compensation circuit

For citation:

Serov V. N., Fetisov L. Yu., Fetisov Yu. K., Chashin D. V. Magnetoelectric Compensation Type Sensor of Permanent Magnetic Fields with Extended Linear Range, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 350—355.

DOI: 10.17587/nmst.20.350-355

Introduction

Magnetic field sensors using the magnetoelectric (ME) effect in composite planar ferromagnetic-piezoelectric structures (FM-PE) are intensively investigated in connection with the prospects of applications in power engineering, in transport, in navigation systems, in geophysics and medicine [1–8].

The principle of the ME sensor operation is as follows: when the structure of an alternating magnetic field $h(f)$ with frequency f is influenced, the magnetostriction causes deformation of the FM layer, this deformation is transferred to the PE layer and an alternating voltage $u(f)$ is generated between the electrodes of the latter due to the piezoelectric effect. The amplitude of the voltage u is proportional to the field h and in addition depends on the value of the constant field H applied to the structure. Therefore, the ME effect in composite structures can be applied for the development of sensors of variables and constant fields.

The sensors created by ME can measure constant magnetic fields H from $\sim 10^{-3}$ to $\sim 2\ldots 100$ E [9–12]. The value of the minimum recorded field is determined mainly by the magnetic noise of the FM layer [13], and the upper limit of the operating range of the sensors is limited by the saturation field of the FM material of the structure [14]. The dependence of the output signal of ME detectors on H is determined by the form of the field dependence of the magnetostriction $\lambda(H)$ FM-layer and, as a rule, has a nonlinear form [15]. In this connection, a very urgent task is to develop methods for linearizing the characteristics of ME sensors of constant fields and expanding their operating range.

In the present work, the ME sensor of constant magnetic fields of the compensating type was first manufactured and investigated. It has been shown that the introduction of a negative feedback circuit comprising a constant voltage amplifier and a compensating coil results in the linearization of the characteristic and the widening of the range of the sensor working fields.

Sensing element of the sensor

The sensor's sensing design based on the ME structure is schematically shown in fig. 1. It contains two FM layers from a magnetostrictive amorphous alloy of the composition FeBSiC (Metglas

2605S3A Magnetic Alloy) [16], 10 × 40 mm in size and 30 μm thick, between which the PE layer was located. The magnetostriction of the FM layers reaches saturation $\lambda_S \approx 22 \cdot 10^{-6}$ in the field $H_S \approx 100$ E, and the piezomagnetic coefficient calculated from the measured $\lambda(H)$ dependence has a maximum of $q = \partial\lambda/\partial H \approx 3 \cdot 10^{-6}$ E⁻¹ at field $H_1 \approx 10$ E. A piezoelectric fiber composite (PFC) (M4010-P1, Smart Materials) [17] measuring 10 × 40 mm and a thickness of 0.3 mm was used as the PE layer. PFC contains a set of fibers from zirconate-titanate lead (PZT-fiber), located between the interdigital transducers with a period of 1 mm. The capacitance and resistance of the PFC at a frequency of 1 kHz were 0.96 nano F and 93 kΩ, respectively. The PZT-fibers are polarized in the longitudinal direction and the piezomodule $d_{33} = 460$ piko K/N operates when deformed. The use of PVC instead of a transversely polarized PZT plate allows several times to increase the output voltage of the sensitive element. The layers of the structure were connected by means of the adhesive "Loctite". An exciting coil with a resistance of 6.7 ohms is tightly wound onto the structure. When an alternating current flows through the coil with frequency f , it creates in the FM-layers an exciting magnetic field $h(f)$ with an amplitude up to 1 E. The measured constant magnetic field H is applied along the axis of the structure. When the structure of the alternating field $h(f)$ and the constant field H influenced on the ME, it generates a voltage $u(f)$ as a result of the ME effect.

Fig. 2 shows the measured dependence of the voltage u generated by the sensitive element of the sensor against the constant field H , with an exciting field of frequency $f = 1$ kHz and amplitude $h = 1$ Oe. The dependence has the form typical for ME structures [18]: the voltage u initially increases approximately linearly with an increase in H , reaches a maximum at a field $H_1 \approx 10$ E, corresponding to the maximum of the piezomagnetic coefficient, and then tends to zero smoothly when the magnetostriction of the FM layer is saturated. It can be seen that only the initial section of the curve in the magnetic field region $0 < H < H_m$ can be used to measure H , where the voltage u uniquely depends on H . For the described sensor element, the upper range of the measured fields did not exceed $H_m \approx 5$ E. Even in this field range, the value of u is nonlinearly dependent on the field H , which requires the use of corrective circuits for linearizing the ME sensor characteristics.

Compensation type field sensor circuit

For the linearization of the characteristics of the sensitive ME element, a compensating type scheme was used [19]. The sensor circuit is shown in fig. 3. It contains: sensor based on the Metglas-PFC-Metglas structure; preliminary amplifier; synchronous detector; alternating voltage generator; constant voltage amplifier and compensating coil included in the negative feedback circuit. A low-noise amplifier with an input impedance of 1 MΩ based on an integrated circuit AD620 provides the necessary matching with the PFC and additional amplification of the signal in $K_1 = 3$ times. The amplified signal is fed to a synchronous detector, developed on the basis of the AD630 chip. Simultaneously, a harmonic signal with a frequency of 1 kHz from the generator on the AD8636 chip arrives at the synchronous detector. The generator is also connected to the exciter coil of the sensing element, which creates an exciting magnetic field. Since the ME structure operates at a frequency far from its own mechanical resonance frequency, there is no phase shift between the input and reference signals of the synchronous detector [20]. In this case, the detector performs a full-wave rectification of the input signal. The low-pass filter at the output of the synchronous detector produces a constant component of the signal U , proportional to the amplitude of the signal u from the sensor element. The total voltage gain of the synchronous detector and filter is $K_2 = 12.7$.

A negative feedback loop of the sensor forms a key K , a constant voltage amplifier and a compensating coil. The amplifier on the OPA551 chip raises the DC voltage U still in $K_3 = 10$ times and provides current in the coil to 200 mA. The coil with the resistance $R_0 = 105$ Ohm and the inductance of 185 mH is switched on in such a way that it creates a constant field of HC up to ~72 Oe in the location of the sensitive element, directed against the measured field H . The feedback coefficient of the circuit $G = R_0/(R + R_0)$ was regulated in a range from zero to one by a change in resistance R (not shown in fig. 3), connected in series with the coil. Negative feedback leads to the fact that the sensing element works at low field values $H - HC \ll H$ for any values of the measured field, which allows linearizing the characteristic of the sensor.

Sensor specifications

Fig. 4 shows the measured dependences of the voltage U at the output of the sensor on the measured magnetic field H for various feedback factors. The curve for $G = 0$ corresponds to the absence of feedback in the circuit and completely repeats the form of the field dependence of the voltage $u(H)$ generated by the ME structure (see fig. 2). It is seen that as the feedback coefficient G increases, the maximum of the curves shifts to higher fields and the initial linear portion expands.

For $G = 1$, the dependence of the sensor output voltage on the field H is linear over the entire range of magnetic fields from 0 to 72 E. With an increase in the feedback coefficient G from zero to unity, the sensor sensitivity (determined from the slope of the dashed curves in fig. 4) decreases from $U/H \approx 620$ to 27 mV/E, that is, approximately 23 times. At the same time, the width of the range of fields of the linear dependence of the output voltage on the measured field expands from ~1.5 to 72 E, i.e., about 50 times. The amplitude of the noise voltage at the output of the sensor with the largest linear range was ~5 mV. Taking into account the sensitivity of the sensor, we find that it allows recording the minimum fields up to $H_{\min} \sim 0.2$ E.

Conclusion

Thus, the expansion of the linear range of sensors for permanent magnetic fields using the ME effect in composite structures has been demonstrated experimentally through the use of a compensation scheme. In a sensor, containing a sensing element based on the metglas-PFC-metglas structure, a synchronous detector, a constant-voltage amplifier, and a compensating coil in the negative feedback circuit, an extension of the linearity range from ~1.5 E to 72 E is achieved, i.e., about 50 times. The extension of the linearity range is accompanied by a decrease in the sensitivity of the sensor, which can be compensated for by increasing the gain of the electronic components of the circuit. The linearity range of ME sensors of the described type can be further extended to the field of high fields by using ferromagnetic materials with a higher saturation field and optimizing the construction of the compensating coil.

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state project for project 8.1183.2017/ПЧ.

References

1. Gutierrez J., Lasher A., Matrins P., Pereira N., Barandiaran J. M., Lanseros-Mendez S. Metallic glass/PVDF magnetoelectric laminates for resonant sensors and actuators: A review, *Sensors*, 2017. Vol. 17, doi.org/10.3390/s17061251.
2. Wang G., Li J., Viehland D. Magnetoelectrics for magnetic sensors applications: status, challenges and perspectives, *Materials today*, 2014, vol. 17, pp. 269–276.
3. Paluszak M., Avirovik D., Zhou Y., Priya S. Magnetoelectric composites for medical applications. In *Composite magnetoelectrics. Materials, structures and applications* / Eds. G. Srinivasan, S. Priya, N. Sun, 2015, Elsevier. P. 297–327.
4. Palneedi H., Annapureddy V., Priya S., Ryu J. Status and perspectives of multiferroic magnetoelectric composite materials and applications, *Actuators*, 2016, vol. 5, pp. 1–31.
5. Jahns R., Knochel R., Greve H., Woltermann E., Lage E. Quandt E. Magnetoelectric sensors for biomagnetic measurements, *2011 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications*. May 30–31, 2011. Bari, Italy, 2011, pp. 107–110.
6. Burdin D. A., Fetisov Y. K., Chashin D. V. Datchik magnitnyj polej geterodinrnogo tipa na osnove nelinejnogo magnitojelektricheskogo jeffekta [Magnetic field sensor of heterodyne type based on nonlinear magnetoelectric effect], *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2014, no. 2, pp. 39–42 (in Russian).
7. Fedulov F. A., Fetisov L. Y., Fetisov Y. K., Makovkin S. A. Datchik magnitnyj polej na osnove magnitojelektricheskogo jeffekta udvoenija chasty v strukture ferromagnet-p'ezojelektrik [Magnetic field sensor based on magnetoelectric effect of frequency doubling in a ferromagnet-piezoelectric structure], *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2015, no. 6, pp. 59–62 (in Russian).
8. Fetisov L. Y., Serov V. N., Bykovcev Y. A., Makovkin S. A., Fetisov Y. K., Kazakevich I. S. Porogovoj datchik magnitnyj polej na osnove avtogenatora s magnitojelektricheskim rezonatorom [Threshold magnetic field sensor based on oscillator with magneto-electric resonator], *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2016, vol. 18, no. 3, pp. 187–192 (in Russian).
9. Nan T., Hui Y., Rinaldi M., Sun N. Self-biased 215 MHz magnetoelectric NEMS resonator for ultra-sensitive DC magnetic field detection // *Scientific reports*. 2013. Article No 1985.
10. Serov V. N., Fetisov L. Y., Fetisov Y. K., Shestakov E. I. Vysokochuvstvitel'nyj magnetometr na osnove magnitojelektricheskogo datchika [High-sensitivity magnetometer based on magneto-electric sensor], *Rossijskij tehnologicheskij zhurnal*, 2016, vol. 4, pp. 24–37 (in Russian).
11. Burdin D., Chashin D., Ekonomov N., Fetisov L., Fetisov Y., Shamoin D. C. Magnetic field sensing based on the nonlinear magnetoelectric effect in magnetic heterostructures, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2016, vol. 49, pp. 375002.
12. Burdin D. A., Chashin D. V., Ekonomov N. A., Fetisov Y. K., Stashkevich A. A. High-sensitivity DC field magnetometer using nonlinear resonant magnetoelectric effect, *J. Magn. Mag. Mater.*, 2016, vol. 405, pp. 244–248.
13. Jahns R., Greve H., Woltermann E., Quandt E., Knochel R. Noise performance of magnetometers with resonant thin-film magnetoelectric sensors, *IEEE Trans. on Instr. & Measur.*, 2011, vol. 60, pp. 2995–3001.
14. Vopsaroiu M., Cain M. G., Sreenivasulu G., Srinivasan G., Balashov A. M. Multiferroic composite for combine detection of static and alternating magnetic fields, *Materials Letters*, 2012, vol. 66, pp. 282–284.
15. Srinivasan G. Magnetoelectric composites, *Annu. Rev. Mater. Res.*, 2010, vol. 40, pp. 153–178.
16. <https://metglas.com/magnetic-materials/>
17. <https://www.smart-material.com/MFC-product-main.html>
18. Chashin D. V., Fetisov Y. K., Tafintseva E. V., Srinivasan G. Magnetoelectric effects in layered samples of lead zirconium titanate and nickel films, *Solid State Communications*, 2008, vol. 148, pp. 55–58.
19. Danilov A. Sovremennye promyshlennye datchiki toka [Modern industrial current sensors], *Sovremennaja elektronika*, 2004, no. 10, pp. 26–35 (in Russian).
20. Fetisov L. Y., Serov V. N., Chashin D. V., Makovkin S. A., Fetisov Y. K., Srinivasan G., Viehland D. A magnetoelectric sensor of threshold DC magnetic fields, *J. Appl. Phys.*, 2017, vol. 121, pp. 154503.

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ APPLICATION OF MNST

УДК 620.3

DOI: 10.17587/nmst.20.356-367

Ю. В. Ануфриев, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: anufriev.u@inme-ras.ru,
Е. В. Зенова, д-р техн. наук, нач. отдела, **Э. Н. Воронков**, д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, Москва, РФ

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЕТА-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ В МИКРОМОЩНЫХ АВТОНОМНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Поступила в редакцию 29.11.2017

Успехи в области микро- и наноэлектроники привели к созданию микромощных автономных устройств сбора информации и управления процессами в микрообъемах, ранее недоступных для исследования. В ряде случаев устройства этого типа должны находиться в полной изоляции от внешней среды в течение длительного времени. Одним из принципиальных вопросов выживаемости миниатюрных, долгоживущих автономных объектов является вопрос их энергопитания.

Рассматриваются свойства и перспективы применения бета-электрических батарей в качестве источника питания, интегрированного в микросхему объекта. Выполнена оценка минимально возможных размеров монолитных устройств с бета-электрической батареей.

Ключевые слова: автономные микромощные системы, бета-электрические микромощные батареи, наноэлектроника

Введение

К автономным устройствам (далее АУ) относят электронные системы, выполняющие задачи по получению, обработке, хранению и передаче информации без получения энергии от внешнего источника [1]. Период функционирования АУ с энергетической точки зрения можно разделить на два режима: молчания (хранения информации) и работы (сбор и передача информации). Переход между этими режимами происходит в соответствии с внутренней программой или по внешнему сигналу.

В работе речь идет об устройствах, мощность которых порядка единиц микроватт, при объеме не более 1 см³ и возможном времени автономного цикла до нескольких сотен лет. Ни один другой тип источников энергии, кроме изотопных бета-электрических преобразователей (далее ВВВ, от англ. *beta voltaic battery*) не в состоянии обеспечить такие параметры в настоящее время. В качестве источника энергии в ВВВ используется β -излучение одного из изотопов, например водорода, никеля или другого элемента. Мощность первичного источника практически не зависит от внешних воздействий и нагрузки. АУ потребляет энергию, полученную преобразованием механической энергии β -излучения (быстрые электроны) в электричество. В работе рассматривается использование в качестве преобразователя электронно-дырочных пе-

реходов, изготовленных в монокристаллах Si в едином технологическом цикле с микросхемой. Эта технология позволяет создать надежное устройство небольших размеров, пригодное для массового производства. Монолитные микромощные АУ с ВВВ в промышленных масштабах не выпускают. Однако выпускаются и находят спрос микромощные ВВВ, изготовленные по гибридной технологии [2]. Примером устройств этого типа являются кардиостимуляторы, качество которых год от года повышается, при постепенном увеличении времени их работы, снижении размеров и цены, которая пока еще остается высокой.

1. Возможные параметры источников питания для автономных микроустройств

Уменьшение размеров полупроводниковых информационных устройств ведет к постепенному снижению средней мощности, необходимой для обработки информации. Снижение удельной энергии, необходимой для перезаписи одного бита, с 1982 года до недавнего времени уменьшалось примерно в 3 раза каждые два года [1]. К настоящему моменту энергия, необходимая для записи бита, уменьшилась примерно с 10^{-7} до 10^{-13} Дж/бит. Однако дальнейшее уменьшение энергетической цены бита должно быть связано с использованием новых принципов записи и хранения информации.

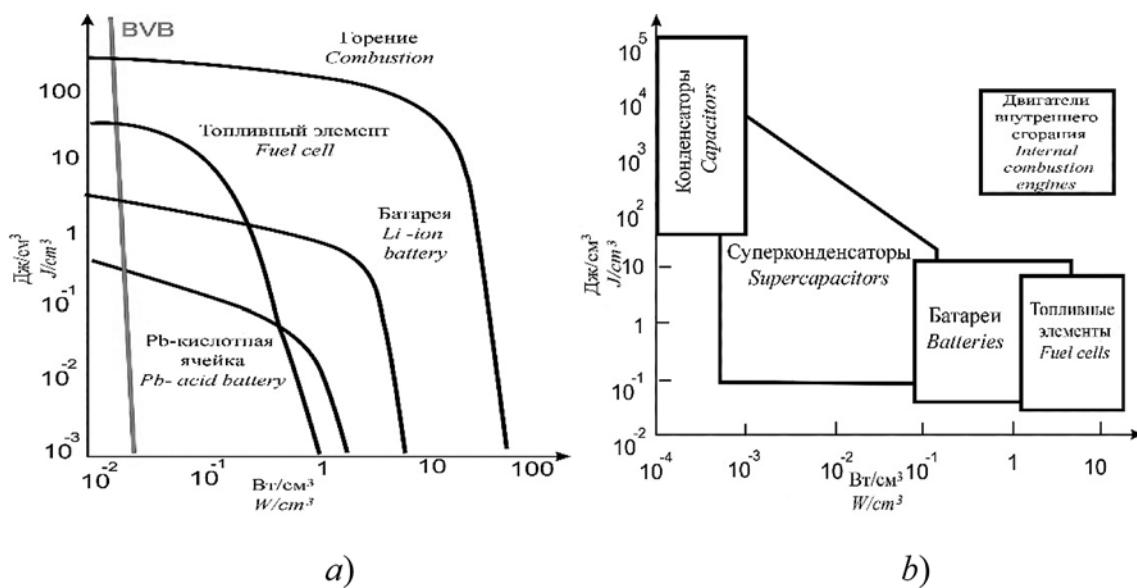


Рис. 1. Зависимость энергоемкости источника от его мощности в расчете на единицу объема: *a* — основной источник электроэнергии; *b* — буферный источник электроэнергии

Fig. 1. Dependence of the energy consumption of a source on its power per a volume unit: a — basic source of the electric power; b — buffer source of the electric power

По мере развития компьютерных технологий происходит постепенное увеличение количества информации, которую можно хранить и обрабатывать в единице объема, однако большую часть объема АУ должен занимать источник энергии. Поэтому при проектировании современных автономных наносистем заданного объема необходимо решать задачу поиска оптимального соотношения между количеством и качеством собранной информации и энергетическими возможностями источника питания.

На рис. 1, *a* представлены зависимости энергоемкости различных источников от их мощности в расчете на единицу объема [3]. Из графиков видно, что самой высокой энергоемкостью могут обладать ВВВ, однако поскольку они используют энергию частиц, излучаемых радиоактивным изотопом, они не способны отдавать энергию быстро, т. е. имеют низкую мощность и, соответственно, подключенные к ним схемы должны быть медленными. Таким образом, основной недостаток ВВВ — чрезвычайно низкие токи. Для обеспечения работоспособности электронной схемы необходимо использовать дополнительный накопитель энергии, и соответственно, схема должна работать попеременно в режиме накопления и расхода энергии. Для рассматриваемых АУ с точки зрения получения максимальной информации при минимальном расходе энергии оптимальным является режим однократной передачи данных, с тем, чтобы вся энергия, поступившая в режиме молчания, ушла на считывание и хранение информации.

Зависимость энергоемкости источника от его мощности для возможных буферных накопителей показаны на рис. 1, *b* [4]. Как видно из рисунка, в качестве хорошего накопителя, обеспечивающего достаточно высокую мощность, могли бы служить литиевые аккумулирующие батареи. Однако использование любых химических источников тока не позволит создать монолитное устройство в едином технологическом процессе. К тому же химические батареи при одинаковой энергоемкости с ВВВ или конденсаторами в десятки раз превосходят последние по объему и весу. Это ставит преграду на пути миниатюризации устройств с химическими аккумуляторами, и предпочтение следует отдать емкостным накопителям.

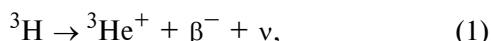
2. Основные характеристики бета-электрического источника питания

Бета-электрический элемент представляет собой ВВВ с одним *p*—*n*-переходом, подключенным к выводам батареи. По структуре и принципу работы он близок к солнечному элементу. Отличие заключается в том, что свободные носители заряда в нем появляются не в результате поглощения энергии света, а в результате поглощения энергии быстрых электронов (β -излучения), поступающего от радиоактивного источника.

Несмотря на то что в настоящее время для создания ВВВ ведутся интенсивные исследования в области таких широкозонных материалов как, например, алмаз, GaN, SiC и др., по-видимому, все-таки наиболее ближайшей перспективой следует

считать организацию массового производства BVB на основе Si, как наиболее технологичного и универсального материала. К тому же изготовление источника питания в том же технологическом процессе, в котором изготавливается микросхема позволит обеспечить значительное уменьшение размеров устройства и его стоимости. Последний фактор чрезвычайно важен, поскольку микромощное устройство с интегрированным BVB источником является изделием одноразового действия.

Значительное влияние на стоимость устройства, его безопасность и утилизацию может оказать выбор источника β -излучения. В таблице приведен список источников, которые часто используются в батареях BVB [5, 6]. Во всех перечисленных в таблице случаях используется генерация быстрого электрона (β -частицы), которая происходит при превращении протона в нейtron с испусканием β -частицы — антинейтрино. При этом происходит превращение исходного атома в атом другого элемента. Так, например, для трития эта реакция выглядит следующим образом:



где β^- — β -частица; ν — антинейтрино.

Как видно из таблицы энергетический спектр испускаемых β -частиц и время полураспада различаются для разных изотопов. Различаются также длина торможения β -частицы и значение энергии, выделяющейся в полупроводниковом материале. В настоящее время ведутся работы по созданию BVB со всеми приведенными в таблице источниками, однако наибольшие успехи достигнуты с тритием. BVB с тритием изготавливают в корпусах, аналогичных корпусам микросхем, и они находят коммерческий спрос [2]. Тритий может использоваться как в кристаллических, так и в тонкопленочных кремниевых преобразователях β -излучения [7]. Средняя длина торможения электронов, испускаемых тритием, в Si составляет 0,2 мкм [8], так что практически вся кинетическая энергия частицы выделяется в полупроводниковой пленке.

При условии полного преобразования этой энергии удельная энергетическая емкость BVB в расчете на единицу объема была бы равна примерно 10 кВт·ч/см³. В пользу трития свидетельствуют следующие факты. Тритий является побочным продуктом при производстве электроэнергии атомными станциями и стоимость его невелика по сравнению с другими изотопами, пригодными в качестве источников β -излучения. Возможное попадание трития в окружающую среду, а вероятность этого существует всегда, может нанести человеку меньший вред по сравнению с другим типом горючего, которое может быть использовано в изотопных генераторах. Тритий является изотопом водорода, и попадание его в организм человека в небольших количествах, так же как идейтерия, не приводит к каким-либо серьезным последствиям, поскольку он с водой довольно быстро выводится наружу. К достоинствам других источников, по сравнению с тритием, следует отнести более высокую энергию частиц, и соответственно возможность получить большую электрическую мощность. Из перечисленных в таблице материалов часто используются ^{63}Ni [9]. Выбор одного из перечисленных в таблице материалов осуществляется исходя из особенностей конструкции и технологии BVB. Однако следует иметь в виду, что ^{63}Ni в десятки раз дороже ^3H . Другие материалы из таблицы еще значительно дороже, чем ^{63}Ni .

На рис. 2 показана одна из возможных конструкций BVB [10]. Электроды, осуществляющие контакт к областям p^+ и p^- , в этом приборе изготавливают из материала, содержащего изотоп. Глубина каналов и расстояние между ними должны быть не менее длины торможения β -частиц. Наличие микроканалов значительно увеличивает облучаемую площадь и соответственно выходной ток.

Рис. 3 иллюстрирует основные процессы, происходящие при преобразовании механической энергии частиц в электричество. На рис. 3 атомы, испускающие β -частицы, содержатся в материале электродов. Тонкими линиями на рисунке показаны траектории вторичных электронов, возникаю-

Основные источники, используемые в BVB батареях
Main sources used in the BVB batteries

Изотоп <i>Isotopes</i>	Период полураспада, лет <i>Half-life period, years</i>	Активность, Ки/г <i>Activity, Ci/g</i>	Средняя энергия распада, кэВ <i>Average disintegration energy, keV</i>	Максимальная энергия распада, кэВ <i>Maximal disintegration energy, keV</i>
Тритий (^3H) <i>Tritium (^3H)</i>	12	9,8	5,7	18,5
Никель-63 (^{63}Ni) <i>Nickel-63 (^{63}Ni)</i>	100,1	10	17,3	67
Кадмий-113м (^{113m}Cd) <i>Cadmium-113m (^{113m}Cd)</i>	14	240	57	190
Прометий-147 (^{147}Pm) <i>Promethium-147 (^{147}Pm)</i>	2,64	12,5	65	220

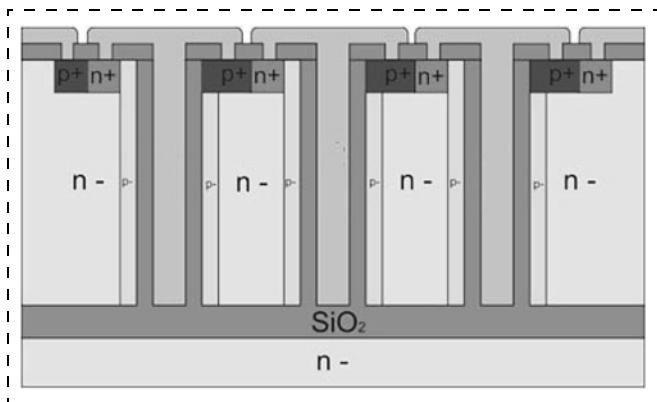


Рис. 2. Одна из возможных конструкций BVB

Fig. 2. One of the possible BVB designs

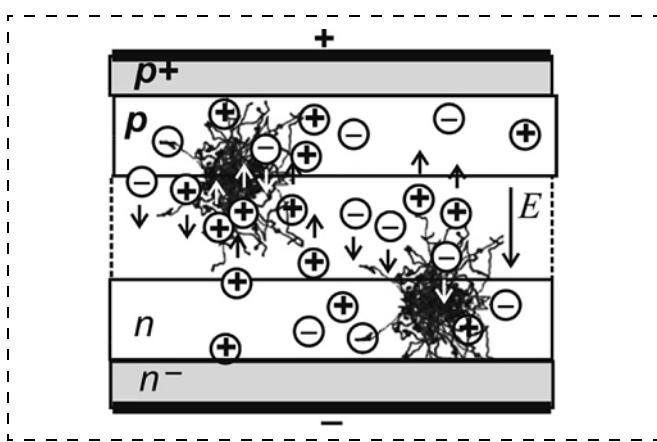


Рис. 3. Схема процессов генерации зарядов и их разделения

Fig. 3. Circuit of the processes of generation of the charges and their separation

ших при торможении β -частиц. Электроны и дырки, возникающие в BVB, обозначены кружками со знаком, стрелками обозначено направление их дрейфа, вызванного внутренним полем E в области пространственного заряда $p-n$ -перехода. Область барьера обозначена пунктиром. Электроны и дырки, возникающие вне барьера, перемещаются диффузионным образом, и в область барьера попадают только те, которые расположены ближе к нему и не успевают прорекомбинировать. Число таких носителей определяется значениями диффузионной длины, которая в Si может достигать микрометровых значений.

Процесс преобразования энергии в первом приближении можно описать тремя основными стадиями, каждая из которых может характеризоваться некоторым коэффициентом эффективности преобразования. На первой стадии происходит поглощение β -частиц, испускаемых источником, расположенным в BVB (не все). Долю поглощенных частиц, достигших барьера, можно характеризовать коэффициентом η_β . Поглощенные β -частицы при торможении разогревают кристалл и генерируют электронно-дырочные пары. Таким образом, часть

кинетической энергии переходит в энергию электронно-дырочных пар. Энергия, необходимая для генерации одной быстрой частицей одной электронно-дырочной пары, примерно в 3 раза больше E_g . Поэтому коэффициентом η_{pn} , который характеризует долю энергии неравновесных электронно-дырочных пар, "рожденных β -частицами", по отношению к общей энергии β -частиц, достигших барьера области, не превышает $\sim 0,3$. Это значение является приблизительным верхним пределом эффективности преобразования энергии в BVB.

На заключительном этапе электронно-дырочные пары, возникшие под действием β -излучения и попавшие в область пространственного заряда, разделяются полем и создают электрический ток во внешней цепи, передавая нагрузке часть энергии β -излучения, поглощенного BVB. Разделение электронно-дырочных пар электрическим полем в области $p-n$ -перехода происходит таким образом, что положительно заряженные дырки попадают на анод BVB (область, легированная акцепторами, p -тип), электроны попадают на катод BVB (область, легированная донорами, n -тип).

Для эффективности преобразования энергии β -частиц в электрическую энергию, проходящую через нагрузку, можно записать:

$$\eta = \frac{P_L}{P_\beta}, \quad (2)$$

где P_L — мощность, появляющаяся в нагрузке при выделении в объеме BVB энергии β -частиц, поглощенных в течение 1 с; P_β — мощность источника β -частиц, расположенного в BVB.

Каждая из стадий имеет свою эффективность преобразования, так что (2) можно записать в следующем виде:

$$\eta = \frac{P_L}{P_\beta} = \eta_\beta \eta_{\beta pn} \eta_{pnL}, \quad (3)$$

где η_β характеризует долю энергии β -частиц, попавшую в активную область BVB, в которой имеет место генерация и разделение электронно-дырочных пар; $\eta_{\beta pn}$ характеризует долю энергии электронно-дырочных пар по отношению к энергии всех поглощенных β -частиц; коэффициент η_{pnL} характеризует эффективность преобразования энергии электронно-дырочных пар в энергию электронов, поступающую в нагрузку.

Коэффициент η_β зависит от конструкции прибора и положения в ней атомов изотопа относительно активной области BVB. Его значение может быть близко к 1, если атомы изотопа находятся в области пространственного заряда барьера [7]. Этот коэффициент уменьшается по мере удаления источника частиц от области барьера и уменьше-

ния энергии частиц. Величина $\eta_{\beta pn}$ зависит от того, какая доля энергии должна быть передана кристаллической решетке быстрым электроном для рождения одной электронно-дырочной пары. Обычно эта энергия составляет примерно $3E_g$.

Это означает, что при генерации электронно-дырочных пар примерно 70 % поглощенного излучения превращается в теплоту. В наших расчетах мы полагали, что энергия, необходимая для одной электронно-дырочной пары, составляет $(2E_g + 0,5)$ эВ [11]. Коэффициент η_{pnL} характеризует эффективность сортирования электронно-дырочных пар $p-n$ -переходом, их разделения электрическим полем и транспорта электронов и дырок к области анода и катода соответственно. Основные потери связаны с рекомбинацией неравновесных электронов и дырок, подобно тому, как это имеет место в солнечных элементах. Поэтому вполне резонно ожидать, что солнечные элементы, имеющие высокие значения КПД при преобразовании солнечного излучения, могут иметь высокие значения коэффициента η_{pnL} . Однако обратное несправедливо, поскольку для эффективного преобразования энергии β -частиц могут быть использованы широкозонные материалы, которые, в принципе, не поглощают солнечное излучение.

Поскольку для преобразования энергии β -излучения используется тот же принцип генерации электронно-дырочных пар, что и в солнечных элементах, выходная характеристика BVB описывается уравнением, аналогичным уравнению вольт-амперной характеристики солнечного элемента [12]:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{nkT}} - 1 \right) - I_m, \quad (4)$$

I_0 — темновой ток $p-n$ -перехода; U — напряжение на $p-n$ -переходе; n — коэффициент неидеальности тока перехода; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; I_m — максимально возможный ток в нагрузке (ток короткого замыкания выходной цепи). Уравнение (4) является нелинейным, поэтому выходная мощность и соответственно КПД преобразования будут зависеть от значения сопротивления нагрузки R_L , т. е. от значений тока и напряжения в нагрузке. Максимальная выходная мощность в оптимизированной нагрузке P_m получается при соблюдении условия:

$$P_m = V_{oc} I_m FF, \quad (5)$$

где FF — коэффициент заполнения. Он тем выше, чем ближе форма реальной выходной характеристики BVB к прямоугольной. Ток I_m пропорционален числу электронно-дырочных пар разделенных в $p-n$ -переходе:

$$I_m = \frac{N_{\beta pn} E_{\beta}}{E_{pn}}, \quad (6)$$

где $N_{\beta pn}$ — число β -частиц, дошедших до барьера и создавших пары, которые были разделены барьером; E_{β} — энергия β -частицы; E_{pn} — энергия образования электронно-дырочной пары, поглощенной β -частицей. Эффективность процесса генерации I_m характеризуется выражением (2):

$$V_{oc} = \frac{kT}{qn} \ln \left(\frac{I_m}{I_0} \right), \quad (7)$$

где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; n — коэффициент, зависящий от свойств барьера (в расчетах $n = 1$); I_0 — тепловой ток барьера; q — заряд электрона. Ток I_0 зависит от механизма рекомбинации носителей в барьере слое, в кремниевых диодах доминируют рекомбинационно-генерационные процессы, поэтому можно записать [13]:

$$I_0 = S \frac{qn_i \sqrt{W}}{\tau}, \quad (8)$$

где S — площадь барьера; n_i — концентрация собственных носителей заряда; W — ширина области пространственного заряда; τ — время жизни неравновесных носителей в барьере;

$$n_i = \sqrt{N_c N_v e^{-E_g/kT}}, \quad (9)$$

где N_c , N_v — эффективная плотность состояний в зоне проводимости и валентной зоне Si соответственно; в расчетах для Si принималось $N_c = 2,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_v = 1,0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [14];

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}(N_A + N_D)U_k}{N_A N_D}}, \quad (10)$$

где ϵ_{Si} — диэлектрическая проницаемость Si ($\epsilon_{Si} = 11,8$); U_k — контактная разность потенциалов; N_A и N_D — концентрации акцепторной и донорной примеси соответственно.

Подобные расчеты приведены и в работе [15].

Легирование выбирают таким образом, чтобы ширина области пространственного заряда в BVB, по возможности, была равна длине торможения β -частиц. Поэтому в расчетах полагалось в BVB с тритием $W = 1 \text{ мкм}$, с другими изотопами с большей длиной торможения β -частиц, 10 мкм.

На рис. 4 показаны рассчитанные с использованием приведенных выше формул и параметров характеристики элементов BVB с площадью 1 см² при использовании изотопов, параметры которых представлены выше в таблице. При расчете полагалось, что все однотипные слои соединены электрически (см. рис. 2) между собой так, что токи от каждого генерирующего барьера складываются. Сам изотоп находится внутри контактного материала.

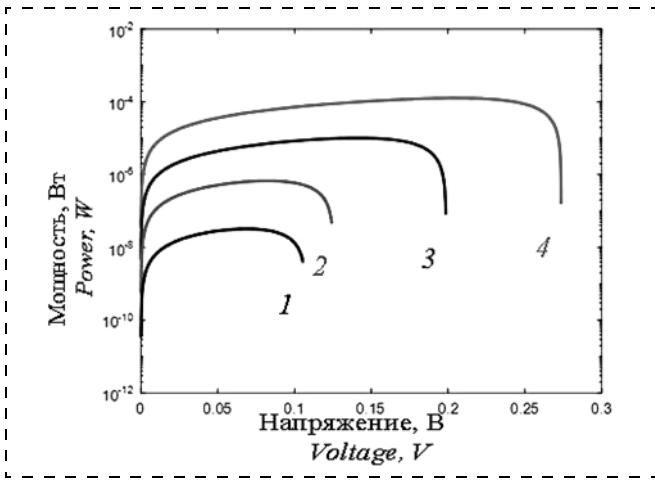


Рис. 4. Зависимость мощности одного барьера BVB от напряжения на нагрузке. Кривые: 1 — ${}^3\text{H}$, 2 — ${}^{63}\text{Ni}$, 3 — ${}^{113}\text{mCd}$, 4 — ${}^{147}\text{Pm}$

Fig. 4. Dependence of the power of a BVB barrier on the load voltage. Curves: 1 — ${}^3\text{H}$, 2 — ${}^{63}\text{Ni}$, 3 — ${}^{113}\text{mCd}$, 4 — ${}^{147}\text{Pm}$

Со временем, по мере истощения изотопного источника, интенсивность излучения, поступающего в активную область BVB, падает, что сказывается на мощности батареи. Время полураспада изотопа характеризует длительность процесса, описываемого следующим уравнением:

$$N(t) = N_0 2^{-t/\tau_{1/2}}, \quad (11)$$

где N_0 — начальная концентрация атомов изотопов.

Поскольку каждый атом при распаде испускает одну β -частицу, мгновенная мощность источника будет характеризоваться уравнением

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N_0 \ln 2}{\tau_{1/2}} 2^{-t/\tau_{1/2}}. \quad (12)$$

Общая энергия, которую источник отдал к заданному моменту времени в нагрузку, будет характеризоваться уравнением

$$\varepsilon(t) = \eta q \varepsilon_\beta N_0 (1 - 2^{-t/\tau_{1/2}}), \quad (13)$$

где ε_β — энергия β -частицы. Эффективность преобразования определяется в соответствии с формулой (2).

3. Оценка пределов возможностей автономного устройства, накладываемых источником питания

На рис. 5 показана зависимость энергии, произведенной однобарьерным BVB, от времени. Расчеты выполнены для $S = 1 \text{ см}^2$, $V = 1 \text{ см}^3$ и ширины области $p-n$ -перехода, равной 1 мкм для электродов с тритием и 10 мкм для электродов с другими изотопами.

Как видно из рис. 5, удельная энергоемкость элемента BVB лежит в пределах от единиц (для ${}^3\text{H}$) до 10^5 Дж/см^3 (для ${}^{147}\text{Pm}$). Таким образом, за время полураспада изотопа в 1 см^3 АУ достаточно для того, чтобы записать от 10^{13} до 10^{18} бит. После полураспада изотопа энергия продолжает производиться, однако в ограниченном количестве. Мощность BVB и количество произведенной энергии возрастают с ростом энергии β -частиц.

Основная задача устройства мониторинга — обеспечение максимально возможного объема информации при минимально возможном расходе энергии. Эта задача может решаться только на базе существующей или находящейся в разработке элементной базы.

Средняя энергия, которая требуется современным электронным устройствам для обработки одного бита информации, составляет примерно 10^{-13} Дж . Однако следует иметь в виду, что это значение получено для КМОП-структур с использованием в качестве накопителей емкостей запоминающих ячеек, т. е. это память, которая требует расхода энергии в период хранения информации. Это неприемлемо для автономных устройств, рассчитанных на длительный период эксплуатации, для них хранение информации должно осуществляться без потребления энергии. Работы в области энергонезависимой памяти интенсивно ведутся в настоящее время, имеются рекламные сообщения об успехах различных фирм в разработке таких устройств на новых принципах и следует ожидать появления соответствующих устройств на рынке. Однако в настоящее время в производстве имеется три типа энергонезависимой памяти, не потребляющей энергии в период хранения. Это широко известная Flash-память, магниторезистивная память и сравнительно недавно появившаяся PCM-память

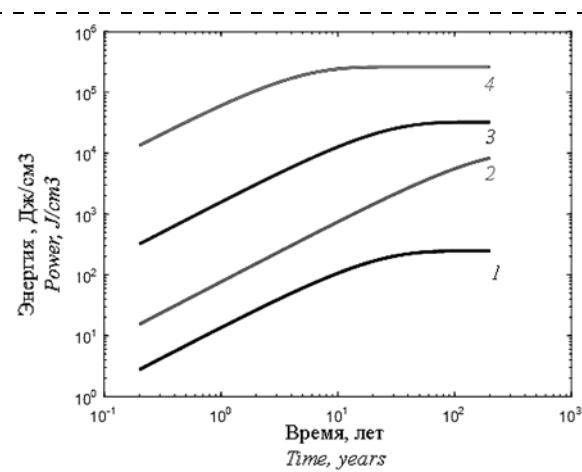


Рис. 5. Зависимость произведенной BVB энергии от времени. Кривые: 1 — ${}^3\text{H}$, 2 — ${}^{63}\text{Ni}$, 3 — ${}^{113}\text{mCd}$, 4 — ${}^{147}\text{Pm}$

(PCM от англ. *Phase Change Memory*), разработанная компанией Intel и выпускаемая фирмами Micron Technology и ST Electronics [16, 17]. Эти ячейки памяти не требуют энергии при хранении информации, однако PCM и магнитно-резистивная ячейки требуют примерно на порядок больше энергии при перезаписи информации, чем EEPROM-ячейки, а ячейки Flash еще больше. К недостаткам Flash-памяти следует отнести также построчную организацию перезаписи и считывания, что требует значительного увеличения энергии и накладывает достаточно жесткие требования на схемотехнику устройств обработки и режим их работы. В перспективе применение Flash-памяти нежелательно, поскольку она трудно поддается дальнейшему масштабированию в область малых размеров. Кроме того, память этого типа значительно менее устойчива к внешним воздействиям, чем PCM, поэтому при оценках перспективы АО с BVB в настоящий момент целесообразно ориентироваться на энергетические параметры PCM, т. е. 10^{-12} Дж на перезапись одного бита.

Заключение

Показано, что функциональные характеристики микромощных АУ будут в значительной степени определяться встроенным источником питания, конструктивные и энергетические характеристики которого должны быть определены на самом начальном этапе проектирования АУ. В качестве источника, рассчитанного на длительный период автономного мониторинга АУ, целесообразно использовать BVB. При этом следует учитывать, что в настоящий момент источник на основе BVB является самой дорогой частью всего устройства [18].

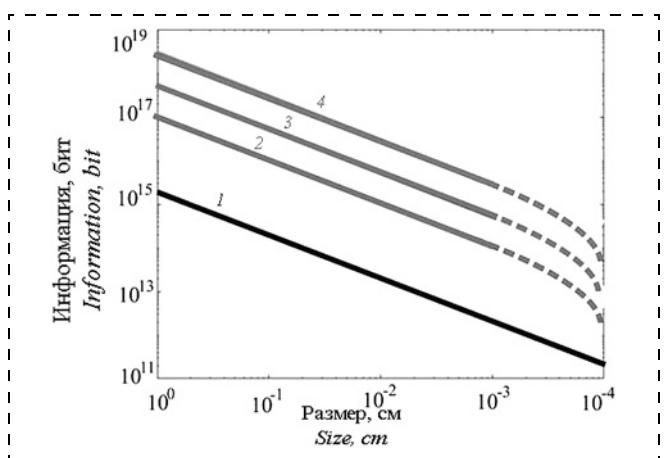


Рис. 6. Зависимость количества информации, накопленной за время полураспада изотопа источника, от размера кристалла. Кривые: 1 — ³H, 2 — ⁶³Ni, 3 — ¹¹³mCd, 4 — ¹⁴⁷Pm

Fig. 6. Dependence of the quantity of information accumulated during a half-decay of an isotope of the source on the size of the crystal. Curves: 1 — ³H, 2 — ⁶³Ni, 3 — ¹¹³mCd, 4 — ¹⁴⁷Pm

Создание наномощных и в конечном счете наноразмерных электронных устройств должно привести к появлению новых методов исследования сложных процессов, происходящих как в естественной, так и в искусственной среде. Создание таких устройств будет способствовать не только появлению нового обширного рынка, но и научному прорыву в некоторых областях. Процесс создания микромощных АУ и сетей на их основе начался, о чем свидетельствует постепенно увеличивающееся число публикаций. Однако мы стоим пока на рельсах традиционных технологий и создаваемые с их помощью устройства громоздки и дороги.

Современные интегральные схемы достигли высокой плотности информации, поэтому с хорошим коэффициентом запаса можно допустить, что в монолитном автономном устройстве, выполненном на основе монокристаллического кремния, 90 % объема займет источник питания. На рис. 6 показаны зависимости количества информации, накопленной за время полураспада изотопа источника, от линейного размера кристалла L при допущении, что объем микросхемы L^3 . Из рис. 6 видно, что даже при весьма малых размерах кристалла, включающего схему и источник питания, автономное информационное устройство с изотопным источником может накопить значительную информацию. Штриховые линии показывают, что уменьшение размеров монолитной схемы после определенного предела сопровождается уменьшением эффективности преобразования энергии β-частиц, поскольку длина их торможения становится сравнимой с размерами кристалла.

Уменьшение размеров источника питания и его интеграция в микросхему потребует не только некоторой модификации стандартного технологического процесса, но и создания элементной базы, обладающей повышенной надежностью и устойчивостью к внешним воздействиям. Это прежде всего относится к элементам основного хранилища накопленной информации — энергонезависимой памяти. Пока выбор не велик. Широко используемая в настоящее время Flash-память не только имеет высокое энергопотребление и низкую надежность, но организация цикла перезаписи и считывания информации, диктуемая принципом ее работы, чрезвычайно неудобна для микромощных устройств, поскольку обслуживание Flash-накопителей требует достаточно мощной периферии. Сравнительно высокая вероятность потери информации при ее длительном хранении МОП-элементами также делает весьма желательным отказ от этих накопителей.

Среди последних разработок, нашедших промышленное применение, представляют интерес PCM-накопители (от англ. *phase change memory*). К достоинствам этой памяти следует отнести не

только низкую вероятность потери информации при хранении [19], но и возможность побитовой адресации при записи и считывании информации, что делает схемотехнику устройства более гибкой и простой, а следовательно, и менее энергоемкой. Среди новейших привлекательных разработок следует отметить возможность использования мемристоров [20], применяемых для записи информации перемещения ионов в ячейках памяти. Этот тип элементов памяти привлекает внимание не только возможностью использовать малые размеры ячеек с низким энергопотреблением, но и потенциальной устойчивостью хранимой информации к внешним воздействиям, широким схемотехническим арсеналом имеющихся средств для работы с такими ячейками, и возможностью перехода от дискретной информации к аналоговой с привлечением соответствующих средств ее обработки, в том числе и нейристорных [21]. Несмотря на медленный темп набора информации при мониторинге, ее передача при достаточном объеме накопленной энергии может быть быстрой, т. е. приборы этого типа могут быть использованы в качестве сигнальных, сообщающих об аварийной ситуации, требующей немедленной реакции.

Следует отметить, что при непрерывном режиме мониторинга рассматриваемые устройства могут быть наиболее эффективными при мониторинге медленно изменяющихся процессов, например, различных биологических процессов или процессов наблюдения за изменением условий на массивных объектах. Изотопные АУ с временем жизни в десятки лет могут стать незаменимым инструментом при изучении объектов, находящихся в дальнем космосе, с помощью комет или астероидов, несущих BVB-АУ и вращающихся по вытянутым орбитам, проходящим вблизи Земли.

Создание миниатюрных устройств автономного мониторинга является одной из тенденций в развитии современных электронных управляющих систем. Создание монолитных BVB-устройств будет способствовать развитию этой тенденции, крайним выражением которой являются работы в области "умной пыли" (англ. *smart dust*) [22, 23].

Показано, что микромощные монолитные автономные устройства с изотопными источниками в течение десятков лет могут собирать и обрабатывать объем информации, достаточный для того, чтобы следить за динамикой изменения локальных свойств объекта. При этом в перспективе общий объем устройств этого типа принципиально может быть снижен до микрометровых размеров.

Список литературы

1. Energy Autonomous Systems: Future Trends in Devices, Technology, and Systems. Cluster for Application and Technology Research in Europe on Nanoelectronics (CATRENE). 2009. 84 p.
2. Murashev V. N., Mordkovich V. N., Legotin S. A., Rabionovich O. I., Krasnov A. A. Peculiarities of Betavoltaic Battery Based on Si // Journal of nano- and electronic physics. 2014. Vol. 6, N. 4, 04012 (2 p.).
3. Russel M. E. Raytheon energy solutions overview. Applying technologies critical to national security // Technology today. 2011. N. 1. P. 4–6.
4. Winter M., Brodd R. J. What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors? // Chem. Rev. 2004. Vol. 104. P. 4245–4269.
5. Revankar S. J., Adams T. E. Advances in betavoltaic power sources // J. Energy Power Sources. 2014. Vol. 1, No. 6. P. 321–329.
6. Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. Моделирование новой бета-вольтаики на монокристаллах LPE *i*-GaAs // Современная электроника. 2015. № 6. С. 10–17.
7. Воронков Э. Н., Ануфриев Ю. В., Теруков Е. И. Бетаэлектрические элементы из аморфного кремния // Журнал технической физики. 2016. Т. 86, № 5. С. 102–106.
8. Evans R. D. The Atomic Nucleus. New York, McGraw-Hill, 1955. 625 p.
9. Горбацевич А. А., Данилин А. Б., Корнеев В. И., Магомедбеков Э. П., Молин А. А. Исследование (моделирование) Ni-63 бета-вольтаических батарей на основе кремневых солнечных элементов // Журнал технической физики, 2016. Т. 86, № 7. С. 94–99.
10. Мурашев В. Н., Леготин С. А., Краснов А. А. и др. Высоковольтный преобразователь ионизирующих излучений и способ его изготовления. Патент РФ № 2608313 от 14 мая 2015 г.
11. Klein C. A. Bandgap Dependence and Related Features of Radiation Ionization Energies in Semiconductors // Journal of applied physics. 1986. Vol. 39, N. 4. P. 2029–2038.
12. Chen C. Julian. Physics of Solar Energy. John Wiley & Sons, Inc. 2011.
13. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. М.: Мир, 1984. 456 с.
14. Шалимова К. В. Физика полупроводников: учебник. СПб.: Лань, 2010. 400 с.
15. Булярский С. В., Лакалин А. В., Абанин И. Е. и др. Оптимизация параметров источников питания, возбуждаемых бета-излучением // Физика и техника полупроводников. 2017. №. 1. С. 69.
16. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 4. С. 60–65.
17. Lai S. Current status of the phase change memory and its future // Proc. IEEE Int. Electron Devices Meeting. 2003. P. 10.1.1–10.1.4.
18. Егармин К. Н., Воронков Э. Н., Козюхин С. А. Оценка информационной надежности ячейки фазовой памяти на основе Ge₂Sb₂Te₅ // Неорганические материалы. 2013. Т. 49, № 9. С. 1–6.
19. Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S. The Missing Memristor Found // Nature letters. 2008. Vol. 453. P. 80–83.
20. Галушкин А. И. Теория нейронных сетей. М.: Издательское предприятие редакции журнала "Радиотехника". 2000. 416 с.
21. Sung Hyun Jo, Ting Chang, Idongesit Ebong, Bhavitavya B. Bhadviya, Pinaki Mazumder, Wei Lu. Nanoscale Memristor Device as Synapse in Neuromorphic Systems // Nano Letters. 2010. Vol. 10, N. 4. P. 1297–1301.
22. Gautam R., Kumari S., Chaudhary S. Smart dust: an emerging technology // International Journal Of Advance Research In Science And Engineering. 2013. Vol. 2, No. 10. P. 131–135.
23. Chivers H., Clark J. A. Smart dust, friend or foe? — Replacing identity with configuration trust // Computer Networks. 2004. Vol. 46. P. 723–740.

Yu. V. Anufriev, Ph. D., Senior Researcher, anufriev.u@inme-ras.ru, **E. V. Zenova**, D. Sc., Head of Department, zenova.e@inme-ras.ru, **E. N. Voronkov**, D. Sc., Senior Researcher, Institute of Nanotechnologies and Microelectronics RAS RF, Moscow, 119991, Russian Federation

Corresponding author:

Anufriev Yuriy V., Ph. D., Senior Researcher, anufriev.u@inme-ras.ru, Institute of Nanotechnologies and Microelectronics RAS RF, Moscow, 119991, Russian Federation

Estimation of the Prospects for the Beta Voltaic Batteries in the Micro-Power Autonomous Devices

Received on November 29, 2017

Accepted on December 19, 2017

Success in the area of the micro- and nano-electronics resulted in creation of micropowerful autonomous devices for collection of information and control of the processes in microvolumes, previously inaccessible to research. In certain cases the devices of this type have to be in a complete isolation from the environment for a long time. One of the questions of principle related to the survival of the tiny, long-living autonomous objects, is the question of their power supply. In the article the properties and prospects of application of the beta voltaic batteries as the power supply integrated into the microcircuit of an object are considered and estimation is done of the minimal possible dimensions of the monolithic devices with a beta voltaic battery.

Keywords: micropower autonomous systems, micropower beta voltaic batteries, nanoelectronics

For citation:

Anufriev Yu. V., Zenova E. V., Voronkov E. N. Estimation of the Prospects for the Beta Voltaic Batteries in the Micro-Power Autonomous Devices, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 356–367.

DOI: 10.17587/nmst.20.356-367

Introduction

Autonomous devices (AD) are the electronic systems, which implement the functions of acquisition, processing, storage and transfer of information without reception of energy from an external source [1]. From the point of view of energy, the period of functioning of AD, can be divided into two modes: silence (information storage) and operation (collection and transfer of information). A transition between these modes occurs according to the internal program or by an external signal.

This work is dedicated to the devices, the power of which is about a microwatt, the volume is not more than 1 cm^3 and possible time of an independent cycle is up to several hundreds of years. Besides the beta voltaic battery (BVB), not any other type of energy source can ensure such parameters. As the energy source, BVB uses the β radiation of one of the isotopes, for example, hydrogen, nickel or another element. The power of the primary source practically does not depend on the external influences and loads. AD consumes the energy received by transformation of the mechanical energy of β radiation (fast electrons) into electricity. The present work is dedicated to the use of the electron-hole junctions made in Si monocrystals in a single technological cycle with a microcircuit, as the converters. This technology allows us to create a reliable device of small dimensions and suitable for a batch production. The monolithic micropowerful AD with BVB are not industrially produced. However, the micropowerful BVB, made by a hybrid technology [2], are produced and find demand. As an example of the devices we can present the cardiotimulators, the quality of which raises, their operating time gradually increases, while their dimensions decrease and so do the prices, which so far remain high.

1. Possible parameters of the power sources for the autonomous micro devices

Reduction of the dimensions of the elements of the semi-conductor information devices leads to a gradual decrease of the average power, necessary for the information processing. Since 1982, the specific energy required for overwriting of one bit has been decreasing three times every two years [1]. The energy, necessary for recording of a bit, has decreased approximately from 10^{-7} J/bit down to 10^{-13} J/bit . However, the further reduction of the energy price of a bit should be connected with the use of new principles of information recording and storage.

The process of development of the computer technologies is accompanied by a gradual increase of the quantity of information, which can be stored and processed in a volume unit, however, most part of

the AD volume has to be occupied by the energy source. Therefore, the designers of the modern autonomous nanosystems should solve the problem of an optimum correlation between the quantity and quality of the collected information and the energy potentials of a power supply.

Fig. 1, a presents the dependencies of the energy contents of various sources on their power per a unit of volume [3]. From the diagrams it is visible that BVB may have the highest energy content, but the lowest power among the sources presented above. Thus, the main drawback of BVB is extremely low currents. In order to ensure the workability of an electronic circuit it is necessary to use an additional energy storage, and the circuit should work alternately in the energy accumulation and the consumption modes. For the considered AD, from the point of view of obtaining of the maximal information with the minimal power consumption, the optimal mode is a one-time data transmission, so that all the energy received in the mode of silence, would be used for reading and storage of information.

The dependences of the energy content of a source on its power for possible buffer storages are shown in fig. 1, b [4]. Apparently, the role of a good storage ensuring the power high enough could be played by the lithium accumulators. However, the use of the chemical sources of a current will not allow us to create a monolithic device in a single technological process. Besides, in case of identical energy content, the chemical batteries have dozens of times bigger volume and weight than BVB or the condensers. This puts a barrier on the way to miniaturization of the devices with the chemical accumulators, and the preference should be given to the capacitive storages.

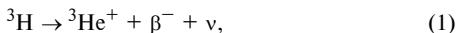
2. Main characteristics of the beta voltaic power source

A beta voltaic element is a BVB with one $p-n$ junction connected to the lead terminal of a battery. By its structure and principle of operation it is close to a solar element. The difference is that the free charge carriers appear in it not as a result of absorption of the energy of light, but as a result of absorption of the energy of the fast electrons (β radiation), coming from a radioactive source.

In spite of the fact that within the programs of development of BVB an intensive research is going on in the field of such wide-band materials as, for example, diamond, GaN, SiC, apparently, nevertheless, the immediate prospects are mostly connected with organization of a batch production of BVB on the basis of Si, as most technological and universal material. Besides, manufacturing of a power source within the same technological process as a microcircuit will allow us to ensure a

considerable reduction of the dimensions of a device and its cost. Latter factor is extremely important, because a micropowerful device with an integrated BVB source is a disposable product.

A considerable influence on the cost, safety and recycling of the device can be rendered by the selection of a source of β -radiation. The table below presents a list of the sources, which are often used in the BVB batteries [5, 6]. In all the cases presented in the table a generation of the fast electrons (β -particles) is used, which occurs during transformation of a proton into a neutron with emission of β -particles — antineutrino. At that, a transformation of the initial atom into the atom of another element occurs. So, for example, for tritium this reaction looks as follows:



where β^- — β -particle; ν — antineutrino.

As one can see, the energy spectrum of the emitted β -particles and the half-decay time are different for different isotopes. Also different are the lengths of braking of the β -particles and the value of the energy emitted in a semi-conductor material. The works for development of BVB are conducted with all the sources presented in the Table, however, the greatest success was achieved with tritium. BVB with tritium are manufactured in the cases similar to the cases of the microcircuits, and they find commercial demand [2]. Tritium can be used both in the crystal and thin-film silicon converters of β radiation [7]. The average length of the braking of the electrons emitted by tritium in Si equals to $0.2 \mu\text{m}$ [8], so, practically all the kinetic energy of a particle is emitted in a semi-conductor film. Under condition of a full transformation of this energy, the specific power of BVB per a volume unit would be equal, approximately, to 10 kWh/cm^3 . The following facts testify in favor of tritium. Tritium is a by-product of generation of the electric energy by nuclear power stations and its cost is not great in comparison with the other isotopes, suitable as sources of β -radiation. A possible leakage of tritium into the environment, and a probability of this exists always, is less harmful for people than that of the other types of fuel, which can be used in the isotope generators. Tritium is the isotope of hydrogen and its presence in a human body in small amounts, just like that of deuterium, does not lead to any serious consequences, because it is removed with water from a body quickly enough. Among the advantages of the other sources, in comparison with tritium, we should name higher energy of the particles, and, accordingly, a possibility to get more of the electric power. Out of the specified materials ^{63}Ni is often used [9]. The choice of one of the specified materials is made proceeding from the features of the design and BVB technology. However, it is necessary to have in mind, that ^{63}Ni is dozens of times more expensive than ^3H . The other materials are even much more expensive, than ^{63}Ni .

Fig. 2 presents one of the possible designs of BVB [10]. The electrodes responsible for the contact to areas $p+$ and $p-$ are made of a material containing an isotope. The depth of the channels and the distance between them should be not less than the length of braking of the β -particles. Availability of the microchannels increases considerably the irradiated area and, accordingly, the output current.

Fig. 3 illustrates the basic processes occurring during the transformation of the mechanical energy of the particles into electricity. Fig. 3 presents the atoms emitting the β -particles contained in the material of the electrodes. The thin lines show the trajectories of the secondary electrons, which appear during braking of the β -particles. The electrons and the holes arising in BVB are designated by rounds with signs, while the arrows designate the directions of their drift caused by the internal field E in the area of the space charge of the $p-n$ junction. The barrier area is designated by a dotted line. The electrons and the holes arising beyond the barrier move in a diffusion way, and only those, which are located closer to it, get into the barrier area and have no time for a recombination. The number of such carriers is determined by the values of the diffusion length, which in Si can reach the micrometer values.

In the first approximation the process of the energy transformation can be described by three basic stages, each of which can be characterized by a certain coefficient of the transformation efficiency. At the first stage there is absorption of the β -particles emitted by a source, located in BVB (not all of them). The share of the absorbed particles, which reach the barrier, can be characterized by coeffi-

cient η_β . During breaking the absorbed β -particles warm up the crystal and generate the electron-hole pairs. Thus, a part of the kinetic energy transforms into the energy of the electron-hole pairs. The energy, necessary for generation of one electron-hole pair by one fast particle, is roughly three times more than E_g . Therefore, the coefficient $\eta_{\beta pn}$ which characterizes the share of the energy of the nonequilibrium electron-hole pairs "born by the β -particles", in relation to the total energy of the β -particles, which have reached the barrier area, does not exceed ~ 0.3 . This value is an approximate top limit of the efficiency of the transformation of energy in BVB.

At the final stage, the electron-hole pairs, arising under the influence of the β -radiation and penetrating into the area of the space charge, are separated by the field and generate an electric current in the external circuit, transforming to the load a part of the energy of the β -radiation, absorbed by BVB. Separation of the electron-hole pairs by the electric field in the area of $p-n$ junction occurs in such a way that the positively charged holes get to the BVB anode (the area alloyed by acceptors, p -type), while the electrons get to the BVB cathode (the area alloyed by donors, n -type).

For efficiency of the transformation of the energy of the β -particles into the electric energy passing through the load, we can put this down in the following way:

$$\eta = \frac{P_L}{P_\beta}, \quad (2)$$

where P_L — power appearing in the load during emission in the BVB volume of the energy of β -particles absorbed during 1 s, P_β — power of the source of the β -particles, located in BVB.

Each of the stages has its efficiency of transformation, so (2) it is possible to present it in the following way:

$$\eta = \frac{P_L}{P_\beta} = \eta_\beta \eta_{\beta pn} \eta_{pnL}, \quad (3)$$

where η_β characterizes the share of the energy of the β -particles, which get into the active area of BVB, in which generation and separation of the electron-hole pairs take place; $\eta_{\beta pn}$ characterizes the share of the energy of the electron-hole pairs in relation to the energy of all the absorbed β -particles; coefficient η_{pnL} characterizes the efficiency of transformation of the energy of the electron-hole pairs into the energy of the electrons, coming to the load.

Coefficient η_β depends on the design of the device and position in it of the atoms of the isotope in relation to the active area of BVB. Its value can be close to 1, if the atoms of the isotope are in the area of the space charge of the barrier [7]. This coefficient decreases with moving of a source of particles away from the barrier area and reduction of the particles' energy. Coefficient $\eta_{\beta pn}$ depends on which share of the energy should be transferred to the crystal lattice by a fast electron for a birth of one electron-hole pair. Usually, this energy roughly equals to $3E_g$.

This means, that during the generation of the electron-hole pairs approximately 70 % of the absorbed radiation turns into warmth. In our calculations we assumed, that the energy, necessary for one pair, equals to $(2E_g + 0.5) \text{ eV}$ [11]. Coefficient η_{pnL} characterizes the efficiency of collection of the electron-hole pairs by $p-n$ junction, their separation by the electric field and transport of the electrons and holes to the anode area and cathode area, accordingly. The basic losses are connected with a recombination of the nonequilibrium electrons and holes, just as this happens in the solar elements. Therefore, it is quite reasonable to expect, that the solar elements, having high coefficient of efficiency during transformation of the sunlight, can have high values of coefficient η_{pnL} . However, the contrary is unfair, because for an effective transformation of the energy of the β -particles the wide-band materials can be used, which do not absorb the sunlight at all.

Since for transformation of the energy of the β -radiation the same principle of generation of the electron-hole pairs is used, as in the solar elements, the output characteristic of BVB is described by the equation, similar to the equation of the volt-ampere characteristic of a solar element [12]:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{nkT}} - 1 \right) - I_m, \quad (4)$$

I_0 — dark current of the p - n junction; U — voltage on the p - n junction; n — nonideality coefficient of the transition current; k — Boltzmann constant; T — absolute temperature; I_m — the maximal possible current in the load (short circuit current of the output circuit). The equation (4) is a nonlinear one, therefore the output power and, accordingly, the transformation of the coefficient of efficiency, will depend on the load of R_L , that is, on the current and voltage in the load. The maximal output power in the optimized load of P_m is received under the following condition:

$$P_m = V_{oc} I_m FF, \quad (5)$$

where FF — filling coefficient. The closer is the form of the real output characteristic of BVB to the rectangular one, the higher is the coefficient. Current I_m is proportional to the number of the electron-hole pairs separated in the p - n junction.

$$I_m = \frac{N_{\beta pn} E_{\beta}}{E_{pn}}, \quad (6)$$

where $N_{\beta pn}$ — number of the β -particles, which reached the barrier and created the pairs, separated by the barrier; E_{β} — energy of the β -particles; E_{pn} — energy of formation of the electron-hole pair absorbed by a β -particle. The efficiency of generation of I_m is characterized by the following expression (2).

$$V_{oc} = \frac{kT}{qn} \ln \left(\frac{I_m}{I_0} \right), \quad (7)$$

where k — Boltzmann constant; T — absolute temperature; n — coefficient depending on the properties of the barrier (in calculations $n = 1$); I_0 — thermal current of the barrier. Current I_0 depends on the mechanism of recombination of the carriers in the barrier layer, while in the silicon diodes the recombination-generation processes dominate, therefore, it is possible to write down the following [13]:

$$I_0 = S \frac{qn_i \sqrt{W}}{\tau}, \quad (8)$$

where S — area of the barrier; n_i — concentration of the own charge carriers; W — width of the area of a space charge; τ — time of life of the nonequilibrium carriers in the barrier;

$$n_i = \sqrt{N_c N_v e^{-E_g/kT}}, \quad (9)$$

where N_c , N_v — effective density of the states in the conductivity zone and in the valency zone of Si, accordingly, in the calculations for Si it was accepted that $N_c = 2.8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_v = 1.0 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ [14];

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}(N_A + N_D)U_k}{N_A N_D}}, \quad (10)$$

where ε_{Si} — dielectric permeability of Si ($\varepsilon_{Si} = 11.8$), U_k — contact potential difference, N_A and N_D — concentrations of the acceptor and donor impurities, accordingly. Such calculations are presented in [15].

Alloying is selected in such a way, that the width of the space charge area in BVB, whenever possible, would be equal to the length of braking of the β -particles. Therefore, in the calculations it was assumed that in BVB with tritium $W = 1 \mu\text{m}$, with the other isotopes of a bigger length of braking of the β -particles — $10 \mu\text{m}$.

Fig. 4 presents the characteristics of the BVB elements with the area of 1 cm^2 calculated with the use of the above formulas and parameters, during the use of the isotopes, the parameters of which are presented in the Table. BVB design is shown. During the calculations it was assumed that all the layers of the same type were electrically connected (fig. 2) in such a way that the currents from each generating barrier would be summed up. The isotope itself is located inside the contact material.

In due course, alongside with the exhaustion of the isotope source, the intensity of the radiation coming to the active area of BVB, falls, which tells on the power of the battery. The time of half-decay of an isotope characterizes the duration of the process described by the following equation:

$$N(t) = N_0 2^{-t/\tau_{1/2}}, \quad (11)$$

where N_0 — initial concentration of the atoms of the isotopes.

Since each atom during disintegration emits one β -particle, the instant power of a source will be characterized by the following equation:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N_0 \ln 2}{\tau_{1/2}} 2^{-t/\tau_{1/2}}. \quad (12)$$

The total energy, which the source has given by the set moment of time to the load, will be characterized by the following equation:

$$\varepsilon(t) = \eta q \varepsilon_{\beta} N_0 (1 - 2^{-t/\tau_{1/2}}), \quad (13)$$

where ε_{β} — energy of a β -particle. The efficiency of the transformation is determined in accordance with formula (2).

3. Estimation of the limits of possibilities of an autonomous device imposed by a power supply

Fig. 5 presents the dependence of the energy generated by a single-barrier BVB on time. The calculations were done for $S = 1 \text{ cm}^2$, $V = 1 \text{ cm}^3$ and the width of the area of the p - n junction equal to 1 micrometer for the electrodes with tritium and equal to 10 micrometers for the electrodes with the other isotopes.

Apparently, the specific power consumption of a BVB element is within the limits from units (for ${}^3\text{H}$) up to 10^5 J/cm^3 (for ${}^{147}\text{Pm}$). Thus, during the half-decay period of an isotope in 1 cm^3 of AD it is possible to record from 10^{13} up to 10^{18} bits. After the half-decay period of an isotope the energy is still generated, however, in a limited quantity. The power of BVB and the quantity of the generated energy increase with the growth of the energy of the β -particles.

The primary goal of the monitoring device is provision of the maximal possible volume of information with the minimal possible power consumption. This problem can be approached only on the basis of either the existing element base, or the element base being in the process of development.

The average energy, which the modern electronic devices require for processing of one bit of information is approximately 10^{-13} J . However, we should keep in mind, that this figure was received for the CMOS structures with the use of the capacities of the remembering cells as the storage devices, and that means it is a memory, which demands a power consumption in the period of the information storage. This is unacceptable for the autonomous devices intended for a long period of operation, because for them the information storage should not involve any energy consumption. At the moment, the works in the field of the non-volatile memory are being intensively conducted, there are advertising messages about success of various firms in development of such devices based on new principles and we should expect appearance of the corresponding devices in the market. However, presently there are three types of commercially available non-volatile memories, which do not require energy in the storage period. These are the widely known Flashmemory, the magnetoresistive memory and the newly appeared PCM memory (*Phase Change Memory*), developed by Intel company and produced by Micron Technology and St Electronics [16, 17]. These cells do not require energy for information storage, however, PCM and the magnetoresistive cells demand roughly ten times more energy for overwriting of information than the EEPROM cells, while the Flash cells demand even more. Among the drawbacks of the Flash memory is also a line-by-line organization of overwriting and reading, which requires considerably more energy and sets rather strict limits on the circuit technology of the processing devices and the mode of their operation. Application of the Flash memory in future is undesirable, because it complicates the further scaling in the area of the small dimensions. Besides, this memory is considerably less resistant to the external influences, than PCM, therefore, in estimation of the prospects of AD with BVB it is expedient to be guided by the power parameters of PCM, i.e. 10^{-12} J for overwriting of one bit.

Conclusion

It was demonstrated, that the functional characteristics of the micropowerful AD would be determined substantially by the built-in power supply, the design and the power characteristics of which should be defined at the very initial stage of designing of AD. As a source intended for a prolonged period of autonomous monitoring of AD it would be expedient to use BVB. At that, it should be taken into account that the BVB-based source is the most expensive part of the whole device [18].

Development of the nanopowerful and, eventually, nano-sized electronic devices should lead to appearance of new methods of research of the complex processes occurring in the natural and artificial environments. Development of such devices will promote not only the growth of a big market, but also a scientific breakthrough in certain areas. The process of creation of the micropowerful AD and networks on their basis has already begun, and a gradually increasing number of publications testifies to that. However, we stand on the rails of the traditional technologies, and the devices created by their means are bulky and expensive.

The integrated circuits have reached the level of a high information density, therefore, we have good reasons to assume that 90 % of the volume of a monolithic autonomous device based on the monocrystal silicon will be occupied by a power supply. Fig. 6 presents the dependencies of the information accumulated during a half-decay of the source's isotope on the linear dimension of crystal L at the assumption of the volume of microcircuit L^3 . From fig. 6 it is visible, what even at rather small dimensions of the crystal, including the circuit and the power supply, the autonomous information device with an isotope source can accumulate a considerable amount of information. The dashed lines show, that a reduction of the dimensions of the monolithic circuit after a certain limit is accompanied by a reduction of the efficiency of transformation of the energy of the β -particles, because the length of their braking becomes comparable with the dimensions of the crystal.

Reduction of the dimensions of the power supply and its integration into a microcircuit will require not only a certain modification of the standard technological process, but also creation of an element base of a higher reliability and resistance to the external influences. This refers to the elements of the basic storage of the accumulated information — non-volatile memory. So far, the choice is not great. The widely used Flash memory is not only characterized by a high energy consumption and low reliability, but the organization of a cycle of overwriting and reading of information, dictated by the principle of its operation, is extremely inconvenient for the micropowerful devices, because the servicing of the Flash storages demands a rather powerful periphery. A comparatively high probability of a loss of information during its prolonged storage by MOS elements is another factor, which makes these storages rather undesirable.

Among the recent developments, which found their industrial applications, of interest are the PCM (*phase change memory*) storages. The advantages of this memory are not only a low probability of a loss of information during its prolonged storage [19], but also a bit-by-bit addressing during recording and reading of information, which makes the circuit technology of a device more flexible and simple, and hence less energy consuming. Among the latest attractive developments we should point out the use of the memristors [20], applied for recording of information of the movement of ions in the memory cells. This type of the memory elements is attractive not only due to a possible use of the small-sized cells with a low energy consumption, but also due to the potential resistance of the stored information to the external influences and a wide arsenal of the circuit means for work with such cells, and a feasibility of a transition from the discrete information to the analog one with the use of the corresponding means for its processing, including the neuristors [21]. Not with standing a slow rate of collection of information during monitoring, its transfer at a sufficient volume of the accumulated energy can be fast, i.e. the devices of this type can be used as alarms informing about the emergencies, which demand an immediate response.

It is necessary to point out, that at a continuous mode of monitoring the considered devices can be most effective for monitoring of the slowly changing processes, for example, various biological processes or the processes of observation of the conditions' variation in massive objects. The isotope AD with a life time of dozens of years can become an indispensable instrument for studying of the objects in deep space by means of comets and asteroids, which carry BVB-AD along the elliptic near-Earth orbits.

Creation of tiny devices of autonomous monitoring is one of the trends in development of the modern electronic control systems. Creation of the monolithic BVB devices will promote development of this trend and contribute to the works in the *smartdust* area [22, 23].

It was demonstrated, that the micropower monolithic autonomous devices with the isotope sources during tens of years can collect and process the volumes of information, sufficient for control of the dynamics of variation of the objects' local properties. At that, in the long term the total volume of the devices of this type can be essentially lowered down to the micrometer dimensions.

References

1. Energy Autonomous Systems: Future Trends in Devices, Technology, and Systems. Cluster for Application and Technology Research in Europe on Nanoelectronics, CATRENE, 2009, 84 p.
2. Murashev V. N., Mordkovich V. N., Legotin S. A., Rabinovich O. I., Krasnov A. A. Peculiarities of Betavoltaic Battery Based on Si, *Journal of nano- and electronic physics*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 04012.
3. Russel M. E. Raytheon energy solutions overview. Applying technologies critical to national security, *Technology today*, 2011, no. 1, pp. 4–6.
4. Winter M., Brodd R. J. What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors? *Chem. Rev.*, 2004, vol. 104, pp. 4245–4269.
5. Revankar S. J., Adams T. E. Advances in betavoltaic power sources, *J. Energy Power Sources*, 2014, vol. 1, no. 6, pp. 321–329.
6. Vojtovich V., Gordeev A., Dumanovich A. Modelirovaniye novoj beta-vol'taiki na monokristallah LPE i-GaAs, *Sovremennaja elektrotehnika*, 2015, no. 6, pp. 10–17 (in Russian).
7. Voronkov Je. N., Anufriev Ju. V., Terukov E. I. Beta-jelktricheskie jelementy iz amorfnoogo kremnija, *Zhurnal tehnicheskoy fiziki*, 2016, vol. 86, no. 5, pp. 102–106 (in Russian).
8. Evans R. D. *The Atomic Nucleus*, New York, McGraw-Hill, 1955. 625 p.
9. Gorbacevich A. A., Danilin A. B., Korneev V. I., Magomedbekov Je. P., Molin A. A. Issledovanie (modelirovaniye) Ni-63 betavol'taicheskikh batarej na osnove kremnivyyh solnechnyyh jelementov, *Zhurnal tehnicheskoy fiziki*, 2016, vol. 86, no. 7, pp. 94–99 (in Russian).
10. Murashev V. N., Legotin S. A., Krasnov A. A. and etc. Vyso-kovol'tnyj preobrazovatel' ionizirujushhih izluchenij i sposob ego izgotovlenija. The patent of the Russian Federation № 2608313 14.5.2015 (in Russian).
11. Klein C. A. Bandgap Dependence and Related Features of Radiation Ionization Energies in Semiconductors, *Journal of applied physics*, 1986, vol. 39, no. 4, pp. 2029–2038.
12. Chen C. J. Physics of Solar Energy. John Wiley & Sons, Inc. 2011.
13. Zi C. Fizika poluprovodnikovyh priborov. Vol. 1. Moscow, Mir, 1984. 456 p. (in Russian).
14. Shalimova K. V. Fizika poluprovodnikov: uchebnik, St. Petersburg, Lan', 2010, 400 p. (in Russian).
15. Buljarskij S. V., Lakalin A. V., Abanin I. E. et al. Optimizacija parametrov istochnikov pitanija, vozbuždaemyh beta-izlucheniem, *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 2017, vol. 1, p. 69 (in Russian).
16. Krasnikov G. Ja., Zajcev N. A., Krasnikov A. G. Sovremennoe sostojanie razrabotok v oblasti jenergonezavisimoj pamjati, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2015, no. 4, pp. 60–65 (in Russian).
17. Lai S. B. Current status of the phase change memory and its future, *Proc. IEEE Int. Electron Devices Meeting*, 2003, pp. 10.1.1–10.1.4.
18. Egarmen K. N., Voronkov Je. N., Kozjuhin S. A. Ocenka informacionnoj nadezhnosti jachejki fazovojoj pamjati na osnove $Ge_2Sb_2Te_5$, *Neorganicheskie materialy*, 2013, vol. 49, no. 9, p. 1–6 (in Russian).
19. Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S. The Missing Memristor Found, *Nature letters*, 2008, vol. 453, pp. 80–83.
20. Galushkin A. I. *Teoriya nejronnyh setej*, Moscow, Radiotekhnika, 2000, 416 p. (in Russian).
21. Sung Hyun Jo, Ting Chang, Idongesit Ebong, Bhavitava B. Bhadviya, Pinaki Mazumder, Wei Lu. Nanoscale Memristor Device as Synapse in Neuromorphic Systems, *Nano Letters*, 2010, vol. 10, no. 4, pp. 1297–1301.
22. Gautam R., Kumari S., Chaudhary S. Smart dust: an emerging technology, *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 2013, vol. 2, no. 10, pp. 131–135.
23. Chivers H., Clark J. A. Smart dust, friend or foe? — Replacing identity with configuration trust, *Computer Networks*, 2004, vol. 46, pp. 723–740.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

MOLECULAR ELECTRONICS AND BIOELECTRONICS

УДК 621.382+612+159.922

DOI: 10.17587/nmst.20.368-384

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

СОЗНАНИЕ ЧЕЛОВЕКА, ИЛИ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНИКИ. ЧАСТЬ II.

Поступила в редакцию 20.12.2017

На основе предложенной ранее полной электронной интерпретации функционирования мозга рассмотрен феномен "сознание человека". В части II работы на основе созданной теории сознания рассмотрены следующие явления: творческое мышление, самоизлечение, измененные состояния сознания, свобода воли, а также проанализированы перспективы сверхразума.

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

Следствия материальности мысли и психических функций

Из предыдущего рассмотрения видно, что автор придерживается классической материалистической точки зрения о том, что "материя — первична, а сознание — вторично". А это означает, что сознание — функция, прежде всего, высокоорганизованной материи живого мозга человека, прошедшего в целом успешно ключевые стадии формирования и развития. Наиболее важными факторами при этом являются: 1) генетика; 2) окружающая среда. Для второго фактора особо следует отметить влияние общества, социальной среды.

В предложенной теории было выделено три типа режимов работы мозга. Для первого типа функционирования (при внешнем воздействии) характерно, что входящие извне сигналы конвертируются в электрические, которые, в свою очередь, приводят к модификации соответствующих нейронных (электрических) цепей. Эти модификации и отражают закодированную информацию о том или ином событии. Иначе запоминание было бы невозможно, и это хорошо известно в нейробиологии [1, 2]. С точки зрения описанной теории автор не видит принципиальной разницы в рассматриваемом вопросе, как инициирован электрический сигнал извне (первый тип режимов) или изнутри (второй тип режимов). А это означает, что

во внутренних режимах работы* мозга (часто мыслительная деятельность и некоторые другие психические функции) должна также происходить модификация нейронных (электрических) цепей. Поэтому мысль и другие психические функции вследствие их материальности могут и должны оказывать обратное (возможно несильное) влияние на нейронные цепи мозга, т. е. их модифицировать, а следовательно, и изменять сам мозг. Последние данные нейробиологии подтверждают, что мысль может оказывать влияние на мозг человека (см., например [6, 7]). Однако, конечно же, живой мозг (нейронные цепи) — первичен, а мысль — вторична.

Материальность мысли и других психических функций имеет важные последствия и может помочь глубже понять, по крайней мере, два рода деятельности: творческое мышление и излечение в результате самовнушения (самоизлечение).

О творческом мышлении. Мною уже отмечалось [3—5], что если отрицать возможность модификации нейронных цепей во внутренних режимах работы, то мы мыслим только "шаблонами" или "стереотипами". Были также отмечены боль-

* Мною отмечалось, что, строго говоря, большинство режимов работы мозга носит смешанный характер (третий тип режимов) [3—5]. Однако наиболее сложным для понимания в рассматриваемом случае являются именно внутренние режимы работы (второй тип).

шие возможности в работе самих нелинейных электрических (нейронных) цепей без их модификации, например, при подаче различных входных сигналов, за счет гибкости связей и колоссального числа цепей (назовем их факторами без модификации). Более того, многие исследователи мозга отмечают склонность человека, особенно с возрастом, мыслить "стереотипами" или "шаблонами". Все это так.

И, тем не менее, даже во внутренних режимах работы, в частности в процессе мыслительной деятельности, когда инициация происходит непосредственно внутри самого мозга, при прохождении электрического сигнала (сигналов) по соответствующему набору нейронных цепей модификации происходят вследствие материальности мысли. Хотя у каждого человека хранящаяся информация прежде всего кодируется именно в топологии (морфологии) нейронных цепей [3–5], однако на их индивидуальность могут влиять очень много факторов [3–5]. Вот лишь некоторые из них: новые связи между нейронами; молекулярные изменения синапсов; синтез РНК, белков, приводящих к структурным изменениям в синапсах, шипиках, дендритах, аксонах, изменениям в ядре клетки и др. Это связано с тем, что нейронные цепи — это постоянно модифицируемые цепи даже при простом декодировании накопленной информации. Хотя величина этой модификации может варьироваться у разных людей* и, в принципе, должна быть незначительной. Таким образом, в процессе модификации или перестройки электрических (нейронных) цепей важными факторами являются изменения связей, геометрии, проводимости, диэлектрической проницаемости и тому подобных соответствующих участков цепей, что достигается с помощью разнообразных биохимических процессов, инициированных в результате прохождения электрического сигнала (сигналов). Назовем их факторами модификации.

Из психологии известно, что творческий процесс может быть представлен в виде четырех этапов [8]: 1) подготовка; 2) инкубация; 3) инсайт (просветление); 4) проверка. Вполне возможно, что в период инкубации как раз и происходит модификация нейронных цепей (действуют факторы модификации) и/или перебор по ним (действуют факторы без модификации**), хотя последний, по крайней мере в ряде случаев, более быстрый процесс. Все это может осуществляться на подсознательном уровне, т. е. работы только более быстрой системы 1 в результате неоднократных прогонов

сигналов. Когда формируется необходимый набор нейронных цепей, который отражает решение изучаемой проблемы, и происходит инсайт (озарение) в результате прохождения по нему электрического сигнала. При этом принципиально важно участие нейронных цепей области мозга, отвечающей за осознание. В противном случае решение может быть утрачено, по крайней мере, на некоторое время. Таким образом, *на процесс творческого мышления может оказывать влияние множество факторов, как с модификацией, так и без ощутимой модификации нейронных цепей, что сильно усложняет анализ этого рода деятельности человека и делает его очень разнообразным с огромным числом вариантов и одним из самых непростых. Сам же процесс творческого мышления, хотя и основывается на внутреннем восприятии человеком закодированной в самом же мозге человека информации, однако эта информация может изменяться вследствие модификации нейронных цепей.*

О самоизлечении. К сожалению, широко распространенный взгляд на самоизлечение заключается в следующем [9]: "... стоит речи зайти о здоровье, как традиционная наука и медицина склоняются игнорировать или преуменьшать влияние сознания на тело... мысль о том, ... что эмоциональное состояние способно предотвратить болезнь, а сознание обладает "целительной силой", считается крайне сомнительной". И, тем не менее, как известно, мозг является главной управляющей системой всего тела, а следовательно, и всех органов человека. Поэтому автор не видит ничего удивительного в том, что с помощью мозга, в частности психических функций, возможна корректировка управления тем или иным больным органом, и в конечном итоге даже его излечение. В литературе подобное выздоровление получило название "излечение в результате самовнушения" [9], а соответствующие случаи рассматриваются и изучаются в поведенческой медицине или психологии здоровья [7]. С точки зрения автора, в основе психологических методов лечения, прежде всего, лежит материальность мысли и других психических функций, а также пластичность мозга, в частности, модификации нейронных цепей. Кратко схему лечения можно представить следующим образом: психические функции (мышление, эмоции и др.) → → электрические процессы → биохимические процессы → самоизлечение.

Какие же процессы могут стимулироваться вследствие материальности мысли и других психических функций? Их может быть много, поэтому отмечу лишь некоторые из них, а именно: 1) корректировка работы цепей управления тем или иным органом; 2) модификации связей управляющих нейронных цепей; 3) стимуляция иммунной систе-

* Это хорошо объясняет известный в психологии феномен "ложных воспоминаний".

** Строго говоря, влияние модификаций незначительно.

мы для усиления воздействия на тот или иной орган или его область (возможно, это наиболее важно при онкологических заболеваниях); 4) стимуляция генных модификаций; 5) нормализация и дополнительная выработка нейрохимических веществ; 6) стимуляция выработки веществ, оказывающих лечебное действие; 7) балансировка работы органов (включая восстановление гомеостаза), в том числе и подсистем самого мозга, и др. Современные данные нейронаук подтверждают такие возможности. Отмечу лишь серьезные научные исследования в нейробиологии на эту тему, описанные в работах [6, 7, 9, 10].

В действительности вопрос еще более сложен. Так, возможно и усиление самокоррекции (она происходит, строго говоря, постоянно автоматически), когда орган сигнализирует мозгу о более серьезных нарушениях в своей работе от нормы в результате обратной связи и мозг пытается самостоятельно (неосознанно) справиться с возникшими нарушениями (первый инструмент). Когда мозг в автоматическом режиме не справляется с корректировкой, могут понадобиться дополнительные меры. И в этом случае самовнушение (второй инструмент) может быть не лишним, т. е., проще говоря, усилить работу мозга в направлении излечения. Скорее всего, при самоизлечении имеет место комбинация действий обоих инструментов, которыми реально располагает мозг человека.

В настоящее время проведен ряд научно-исследовательских работ по самоизлечению. Особый интерес представляет широко исследованный "эффект плацебо" (см., например [9]). "Феномен выздоровления после минимого лечения хорошо известен в медицине и называется эффектом плацебо" [9]. С точки зрения автора работы [9], "эффект плацебо" — это пример, "наверное, чистейшего влияния сознания на организм".

Сейчас можно считать уже доказанным, что лечение с использованием ряда лекарств не эффективнее плацебо. Более того, традиционным стало предварительное исследование на группах больных, в которой одной группедается плацебо (таблетки — пустышки и т. п.), а другой группе — предполагаемое лекарство. Если эффективность последнего не выше плацебо, а такие случаи нередки, то новое "лекарство" обычно не доводится до производства. Замечу, что ряд достаточно известных и распространенных лекарств не прошли успешно подобные "более тщательные проверки", как правило, независимые от производителя. Читатель может найти много примеров "эффекта плацебо" в историях до нашей эры и вплоть до сегодняшнего дня (см., например, также [9, 11]).

В результате проведенных научно-исследовательских работ "эффекта плацебо" было установлено

но, что он может оказывать положительное влияние на самые различные заболевания, а именно [9]: болезнь Паркинсона, синдром раздраженного кишечника, депрессию, тревожные состояния, аддицию, мигрени, головные боли; оказывать обезболивающее воздействие и др. И все же "эффект плацебо", как мне кажется, определяется не только сознанием, но и зависит от различных психических функций, в том числе и на подсознательном уровне.

Не менее впечатляющие результаты получены при использовании восточных практик медитации (см., например, недавние исследования [6, 7]), других эмпирических практик (методики Э. Куэ, Х. Сильвы, Дж. Кехо и др. [12]), современных психотерапевтических методов (см., например, [13, 14]) для лечения самых различных заболеваний, включая рак. В принципе, эти успехи также могут быть объяснены имеющимся набором процессов и инструментов, отмеченных ранее, которыми обладает мозг человека. Иногда усиливением и более направленным их действием.

Однако следует остановиться и на некоторых возможных негативных моментах попыток самоизлечения. Во-первых, не каждая болезнь у конкретного человека может быть вылечена по данному методу. И объяснение — тривидальное: просто недостаточно ресурсов, которыми располагает для этого мозг (организм) человека, так как они все же ограничены, а сама болезнь возможно запущена. Во-вторых, мозг является суперсложной системой и не так просто направить сигналы на модификацию работы необходимых нейронных цепей. Проблема усугубляется тем, что больной часто не знает в чем сущность его болезни, а иногда и просто не подозревает или не понимает, что болен. В результате метод может быть медленно- и слабодействующим, что зависит от многих внутренних и внешних для человека обстоятельств. В связи с этим подчеркну особую важность в данном методе веры, настойчивости и концентрации*, что могут обеспечить отмеченные выше практики и методы. И не только. В этом плане положительное влияние может оказывать и религия, что хорошо известно из истории по многочисленным случаям исцеления. Не думаю, что все они — плод фантазии. В-третьих, крайне негативное влияние оказывает в рассматриваемом случае отрицательный стресс, или дистресс — "вредоносный или неприятный стресс" [15]. Современные научные исследования показывают, что множество заболеваний человека связано

* Эти факторы, по-видимому, способствуют неоднократному прогону электрического сигнала по соответствующим нейронным цепям (НКС, НКПФ), а следовательно, и возможно, более сильному их изменению в нужном направлении.

именно с влиянием дистресса [16]. Особенно плохое воздействие он может оказывать именно на мозг; вплоть до разрушения нейронных цепей. Существует и специальный термин "эффект ноцебо" [9]. Это когда сознание вместо оздоровления организма вызывает патологические симптомы и изменения. Печальными примерами являются даже смерть вполне здоровых людей в результате: будистских проклятий [9]; после кораблекрушений в море при наличии вполне достаточных средств для спасения (плавсредств, продуктов питания, воды) [17]; паники, например, после землетрясения [9]. В этих случаях человек умирает от страха. Можно сказать, что в таких ситуациях мозг запускает механизм "самоуничтожения" (вместо самосохранения), вызванный сильным дистрессом.

Можно ли другими искусственными методами, кроме традиционных в медицине, усилить эффект излечения? Думаю, что да. И здесь в связи с предложенной полной электронной интерпретацией функционирования мозга перспективным вижу использование возможностей электроники и нанонаук [18]. Мною уже отмечались в этом плане различные методы электрической стимуляции мозга (ЭСМ), а именно: электрического раздражения мозга; глубокой стимуляции мозга. Следует, однако, выделить методы лечебной электрической стимуляции (ЛЭС) головного и спинного мозга, а также периферических нервов человека с применением "щадящих методов стимуляции", разработанных под руководством академика Н. П. Бехтеревой, с помощью которых достигнуты значительные успехи в лечении самых различных заболеваний [19]. Особая ценность методов ЭСМ заключается в том, что они могут не только стимулировать создание и модификацию нейронных цепей мозга, но и разрушать лишние, патологические цепи. Среди последних наработок отмечу исследования доктора К. Трейси в лечении воспалительных процессов с помощью электростимуляции блуждающего нерва [9]. Несмотря на перспективность данных работ, еще многое предстоит сделать для их развития (особенно точности стимуляции, уровней сигналов воздействий и др. [3, 18]) и широкого внедрения в практику.

Итак, *использование силы сознания, материальности мысли и других психических функций может быть важным дополнением к традиционным методам лечения медицины*. Следовательно, целесообразно комплексное лечение, сочетающее эти два подхода, хотя не исключено, что они могут не только помогать, но и "мешать" друг другу. В частности, известно, что ряд лекарств оказывает отрицательное влияние на мозг человека (см., например, [20]). И, тем не менее, по крайней мере, вера в выздоровление — желательна!

Измененные состояния сознания

То, что происходит в мозге у человека в сознании в целом, хорошо описано в книге [21]: "Поток нашего субъективного переживания течет непрерывно, следя своему руслу; ощущения, образы, эмоции и мысли сливаются друг с другом, постепенно перетекая друг в друга в изменчивых паттернах и узорах". И в то же время иногда поток может быть особенным. "Необычные совокупности субъективных переживаний называют "измененными состояниями сознания"" [21]. В дальнейшем ИСС. В настоящее время к ИСС относят широкий спектр феноменов. К основным и наиболее интересным можно отнести [21]: состояния во сне; гипнотические состояния; наркотическое опьянение; медитативные состояния; состояния "потока"; внетелесные переживания; околосмертные переживания; мистические переживания. К состояниям, близким к ИСС, можно отнести и некоторые ПСИ-феномены, а именно: ясновидение, телепатию и др. К патологическим (иногда необратимым) ИСС, в принципе, можно отнести различные психические заболевания (этот вопрос был рассмотрен в работе [18]).

Какими же факторами определяются все эти феномены? Что для них общего? Во-первых, индивидуальность нейронных цепей каждого конкретного человека и является предопределяющей материальной основой субъективности [18]. Во-вторых, ИСС, включая и психические заболевания [18], можно связать с отклонением функционирования нейронных (электрических) цепей от нормальных режимов работы. Замечу, что вопрос об определении понятия "нормальный" в психологии столь же сложен, как и определение понятий "сознание" и "ИСС", что опять же связано с многогранностью соответствующих явлений. И тем не менее этот вопрос принципиальный в психологии. Отметчу, что в нейропсихологии понятие "норма психической функции" введено давно [22]. В целом, без этого понятия невозможно рассматривать как различные психические заболевания, так и собственно ИСС. Итак, *в соответствии с полной электронной интерпретацией выделю два ключевых фактора, определяющие для ИСС, а именно: индивидуальность нейронных (электрических) цепей мозга и отклонения в их функционировании от нормальных режимов работы*.

Индивидуальность нейронных цепей зависит от очень многих факторов, подробно рассмотренных в работах [3—5, 18] и более кратко — ранее. Одним из основных в рассматриваемом случае является топология нейронных цепей, формирующихся для реализации той или иной функции. Данные нейронаук, в частности визуализации, свидетельству-

ют, что даже у конкретного человека при реализации одной и той же функции состав ансамблей нейронов варьируется, причем нередко существенно, что подчеркивает важность гибкости связей. В терминологии академика Н. П. Бехтеревой [23] обеспечение функций осуществляется как жесткими, так и гибкими звенями нейронов.

Зададимся вопросом: каким образом можно осуществлять взаимодействие такого грандиозного числа существенно нелинейных активных элементов, т. е. отмеченных НЭМС, электрических (нейронных) цепей, которые, судя по всему (см. последний раздел), составляют незначительную часть от их общего числа, при обеспечении функции? И при этом, чтобы они не мешали друг другу при обеспечении многочисленных функций, проходящих параллельно. Автор видит только *возможность, вытекающую из локально-распределенного характера мозга, как системы, а именно: синхронизация динамических взаимодействий электрических (нейронных) цепей в различных областях мозга. При этом, учитывая нелинейность электрических цепей, должны быть важны не только фазовые, но также частотные и амплитудные характеристики электрических сигналов*. Замечу, что именно амплитуда сигнала в основном и определяет энергетические затраты.

Важность нейронной синхронизации отмечают многие специалисты в области нейронаук. Традиционно в нейробиологии выделяют локальную и фазовую синхронизацию. Так, при обеспечении сознательной деятельности особая роль придается гамма-волнам (фазовая синхронизация) (см., например, беседу с профессором В. Зингером в [24], [7]).

Следует также обратить внимание на приводимые ниже факты.

1. Уровень активности отдельных областей мозга может значительно отличаться у разных людей при одних и тех же действиях и достигать "трех тысяч процентов" [7].

2. Даже серьезные психические заболевания могут быть вызваны, казалось бы незначительными на первый взгляд, отклонениями, в частности, "люди с депрессией испытывали недостаток не в стимулировании, а в поддержании активности системы вознаграждения в префронтальной коре" [7].

3. Важные данные получены с помощью ЛЭС, а именно: "Повторные стимуляции одной и той же зоны (структуры) мозга с одинаковыми параметрами в зависимости от ее исходного состояния могут вызывать реакции, не только отличающиеся по интенсивности и знаку, но и качественно новые" [19].

Перечисленных данных вполне достаточно, чтобы понять, что и вопрос об отклонении работы нейронных (электрических) цепей от нормальных

режимов не менее сложен и зависит от конкретного человека и, более того, от момента времени. Это подчеркивает динамический характер мозга как в работе, так и в его развитии. Таким образом, даже нормальные психические функции могут обеспечиваться у каждого человека своим набором нейронных цепей, причем варьироваться от случая к случаю, а у разных людей уровень активации может отличаться значительно. В связи с этим, по-видимому, перспективным является создание банка данных "наборов портретов базовых психических функций" у здорового молодого человека с помощью, например, средств визуализации, а в дальнейшем ориентироваться на этот "нормальный набор" с возрастом, т. е. и здесь желателен индивидуальный подход.

И тем не менее, последние данные нейробиологии свидетельствуют о том, что мозг реконструирует действительность (см., например [24—26]). Автор полностью разделяет эту точку зрения [3, 4] и поэтому считает, что *все ИСС связаны с различного рода изменениями,искажениями и нарушениями в этой реконструкции в мозге человека, как правило, характеризуемыми существенными проявлениями*.

Согласно данной точки зрения можно выделить доминирующие, характерные причины и свойства тех или иных ИСС. Рассмотрим кратко некоторые из отмеченных ИСС, так как этот вопрос заслуживает отдельной работы.

Медитацию, состояния "потока", как показывает анализ имеющихся сведений, можно связать, прежде всего, с усилением синхронизации. В частности, исследования с помощью средств визуализации мозга медитирующих тибетских буддийских монахов позволили получить ряд важных результатов [7]. Наиболее интересными из них являются следующие [7]: 1) усиление активности гамма-волн, причем они увеличивались постепенно, что свидетельствует о необходимости времени для синхронизации; 2) "монахи с наибольшим опытом медитации продемонстрировали наибольшую гамма-синхронность (как в исходном состоянии, так и во время медитации)"; 3) в участках внимания "активность возрастала и увеличивалась по мере того, как увеличивалось количество часов, которые медитирующий провел за практикой, но затем падала — после того как количество часов начинало превышать двадцать пять тысяч или около того". Последнее означает, что активность некоторых областей мозга может не только возрастать, но и падать, что свидетельствует о более экономичных режимах работы мозга более опытных медитирующих монахов. Многое конечно зависит и от конкретной формы, практики медитации [7, 21]. Подобные явления, судя по всему, происходят в состояниях "потока" творчески мыслящих людей [27].

Среди известных причин сна автор выделил следующие [3–5]: 1) физиологические; организму, в том числе и мозгу, требуется отдых, восстановление необходимых веществ и т. п.; 2) возможность обработки и систематизации вновь поступившей и накопленной ранее информации, в том числе и ее закрепление (консолидация), а проще говоря, происходит дополнительная модификация нейронных цепей. Важными являются сведения, полученные с помощью средств визуализации. "Функциональная томография мозга показывает, что во время сновидений в коре активны зрительные (затылочно-височные), эмоциональные (мандиалина) и моторные области (лобная кора), а области, связанные с критическим мышлением и самосознанием (в префронтальной коре)dezактивированы" [21]. С одной стороны, это свидетельствует о переходе во сне мозга в основном на более экономичный режим работы системы 1 (исключением, по-видимому, являются людидные сновидения), а с другой стороны, фактически показывает нам как работает система 1, т. е. подсознание. Следует, однако, иметь в виду, что при этом лимбическая система, отвечающая в основном за эмоции, наиболее активна [28]. В результате система 1 характеризуется, по-видимому, более "хаотическим прохождением электрического сигнала по нейронным цепям мозга" [3–5]. Поэтому и был сделан вывод о том, что "сновидения — "хаотический режим" работы мозга", хотя и отмечалось, что "некоторые мыслительные акты могут все же носить близкий "псевдохаотический" характер" [3–5]. В связи с этим не вызывает удивления, что практика внимательного осознания [6], характерного для медитации, систематизирует работу мышления, делает его более направленным, что часто имеет место и для состояний "потока".

Хотя автор и разделяет в целом критическую точку зрения на ПСИ-феномены (см., например, [11, 29]), однако все же не придерживается крайне негативного взгляда на эту проблему, вплоть до полного отрицания феноменов. Думаю, что многие ПСИ-феномены, в частности ясновидение и телепатия, могут быть часто объяснены теми или иными особенностями режимов функционирования мозга человека, т. е. важна их правильная интерпретация.

Прежде всего, главная сложность в объяснении таких феноменов заключается в том, что львиная доля работы мозга в этих случаях протекает на подсознательном уровне. Отсюда и их загадочность, таинственность.

Ясновидение, телепатия, по-видимому, связаны с усилением прогностических возможностей мозга человека. Это может быть вызвано следующими обстоятельствами: 1) повышением чувствительности сенсорных систем; 2) обострением чувстви-

тельности нейронных цепей к внешним и/или внутренним сигналам; 3) гибкостью связей при ассоциативной обработке информации в имеющихся в мозге нейронных цепях. Первое и второе означает, что нейронные цепи становятся восприимчивы даже к подпороговым сигналам, т. е. не восприимчивым для большинства людей или во многих ситуациях для конкретного человека. Чем же может быть вызвано такое обострение?

Автор видит следующие многочисленные возможности, способствующие этому: ритуалы, медитация, мистические состояния и иные ИСС, состояния сильного стресса (и не только дистресса) и др. Интересно заметить, что биографии двух выдающихся телепата и ясновидящей последнего времени — В. Мессинга и Ванги — свидетельствуют о том, что началом их экстрасенсорных возможностей послужили именно сильные дистресссы на грани смерти [30, 31]. Аналогичные способности иногда начинают проявляться (обостряться) и у людей, прошедших состояние клинической смерти [32–34]. Эти обострения чувствительности нейронных цепей, судя по всему, вызваны в основном изменением биохимических процессов, протекающих в них. Возможно и их морфологическими изменениями. Организм как бы пытается адаптироваться к качественно новым условиям, вызванным сильнейшим дистрессом.

Наконец, вполне возможны просто выдающиеся прогнозисты, обладающие такими возможностями от рождения, т. е. генетически предрасположенные к этому роду деятельности. Ведь существуют выдающиеся ученые, политики, спортсмены и др. Почему бы не быть выдающимся прогнозистом? История изобилует фактами гениальных догадок, прогнозов и т. п. Достаточно отметить эпиграф работы. Тем более хорошо известно, что мозг каждого человека постоянно занимается прогнозами, т. е. тренируется регулярно. В сущности, прогнозирование — это одна из основных функций мозга (см. ранее). Не вижу серьезных оснований и к тому, чтобы нельзя было бы развивать подобные способности (см., например [34, 35]).

В то же время прогноз телепатом осуществляется за счет информации, имеющейся о другом человеке или/и поступающей от него. И тут, судя по всему, могут быть важны различного рода известные физические поля. Часто в литературе их называют "биополем". Так, академик Ю. В. Гуляев отмечал, что "вокруг любого биологического объекта в процессе его жизнедеятельности возникает сложная картина физических полей. Их распределение в пространстве и изменение во времени несут важную биологическую информацию, которую можно использовать" [36]. Именно эту информацию, хотя бы частично, по-видимому, и использует телепат

для прогноза, т. е. для "чтения мыслей". Кроме того, важными могут быть и особенности его ассоциативной обработки информации.

К сожалению, часто эти феномены ненадежны, случайны, эпизодичны и носят, как правило, приближенный характер, что обычно требует их дополнительной расшифровки. Последнее особенно хорошо получается, когда "спрогнозированное", "предсказанное" событие уже произошло, т. е. "задним числом". Не редки и просто случайные совпадения, мошенничество и т. п. Это обычно и отмечается в серьезных работах на тему ПСИ-феноменов (в том числе и других). Грань же между серьезными исследованиями, экспериментами и шарлатанством часто бывает весьма тонкой. Ведь очень "скользкими" (ненадежными) являются эти феномены, что, в общем-то, неудивительно для прогнозов, даже коллективных.

В любом случае эпизоды "ясновидения" и "телепатии", впрочем, как и многих других ПСИ-феноменов, являются продуктом деятельности мозга конкретного человека в конкретных ситуациях, а не каких-то потусторонних сил, мифических полей. В связи с этим выдающихся ясновидящих и телепатов можно назвать "гениями обостренной интуиции".

Наиболее сложными для объяснения казались следующие ИСС: внетьесные переживания (ВТП) и околосмертные переживания (ОСП). Для ОСП характерно пять основных элементов [21] (более пятнадцати характерных элементов [32, 33]), одним из которых является ВТП. ВТП — переживания человека, которое производит очень сильное впечатление прежде всего на него же самого и часто используется в качестве явного доказательства нематериальности сознания, которое якобы в этих случаях отделяется от физического тела. Автор не считает эту точку зрения верной.

ВТП и ОСП являются ИСС, в которых происходят явные нарушения реконструкции действительности в мозге человека в соответствующих ситуациях и характеризующихся галлюциногенными переживаниями. Чем же вызваны ВТП и ОСП?

Судя по всему, при ВТП и ОСП происходят сильные нарушения биохимических процессов в мозге человека, что и приводит к серьезным отклонениям в работе нейронных цепей, т. е. причиной являются физиологические изменения в организме.

Последнее время изучению этих феноменов придается все более серьезное внимание. Выделю наиболее важные на настоящий момент времени установленные достоверные научные факты.

1. В неврологии и психиатрии переживания, подобные ВТП, известны давно и называются ауто-скопией (см., например [21, 24]).

2. ВТП могут возникнуть при различных жизненных обстоятельствах: чрезмерных физических и умственных нагрузках, опасных ситуациях (необязательно ОСП) [21].

3. При ВТП часто происходят отклонения (и в результате повреждения) в работе височно-теменной коры головного мозга и др. [21, 24].

4. Показано, что ВТП могут быть искусственно вызваны "судорожной активностью, стимуляцией мозга и некоторыми психотропными веществами" [37].

5. Возможны и виртуальные ВТП, вызванные необычной и противоречивой информацией о положении тела человека, участвующего в эксперименте [24].

Важные исследования по ОСП описаны в работе [21], подтверждающие связь с повреждениями в определенных областях мозга, причем отмечается, что "все эти структуры часто оказываются повреждены у больных, переживающих остановку сердца, но полностью восстанавливаются" [21]. При испытаниях на центрифуге, когда кровь отливает от мозга, возникают галлюцинации, подобные ОСП [11].

И наконец, очень важным является то, что отмечал один из пионеров исследования ОСП — доктор Р. Моуди, а именно [32]: "Несмотря на большое разнообразие обстоятельств, связанных с приближением смерти, а также типов людей, переживающих это, между рассказами о самих событиях, происходящих в этот момент, имеется поразительное сходство. Оно настолько велико, что можно выделить около пятнадцати элементов, которые вновь и вновь встречаются среди большого числа рассказов". Вот это сходство для самых разных людей, как мне кажется, лишний раз подтверждает то, что как при ВТП, так и при ОСП происходят характерные последовательности физиологических изменений в мозге (имеют место общие закономерности), к счастью, в рассматриваемых случаях во многом обратимые. Эти физиологические изменения и приводят к приблизительно одинаковым специфическим режимам работы нейронных цепей, вызванных соответствующими биохимическими изменениями в мозге человека. Следует, однако, отметить качественные перемены в жизни людей после ОСП, что отмечалось во многих исследованиях (см., например [32—34]), т. е. эти изменения все же не бесследны.

О свободе воли

Автором отмечалось, что "именно гигантские объемы входной информации и являются своеоб-

разным "двигателем" (инициатором) эволюции" [3]. Естественный отбор дарвиновской теории можно назвать основным методом ее практической реализации. В то же время информационным отпечатком эволюции живых организмов является "лентопись ДНК" молекул [38], которые фактически кодируют программу создания соответствующего организма. И сознание человека связано с информацией и в сущности возникло и предназначено для более качественной ее обработки, но, к сожалению, это не всегда достигается на практике.

Рассмотрим более подробно другой трудный вопрос из основных, связанных с сознанием, а именно "свободу воли".

Вопрос о "свободе воли" напрямую связан с рассмотренной ранее спецификой работы системы 2. В частности, вариант, изображенный на рис. 2, *a* части I, в сущности, и вызвал бурную дискуссию в нейробиологии (эксперименты Б. Либета, Дж.-Д. Хайнса и др.), т. е. сначала происходит действие, а затем — осознание. Удивительно, что эти эксперименты привели многих специалистов, включая известных в нейронауках, к выводу о том, что "свободы воли" не существует. Вопрос далеко не праздный, так как за этим отрицанием стоит возможность оправдания и безнаказанности за преступления, в том числе серьезные (см., например [39]).

Главная ошибка в подобных рассуждениях состоит в том, что не учитывается другой вариант мыслительной деятельности, изображенный на рис. 2, *b* части I, т. е. сначала просто подумаем, подготовимся к действию, а также и то, что мыслительный процесс может быть представлен проходящим "по спирали", так как обычно он не ограничивается одним "витком", циклом. Свобода выбора или "свобода воли" как раз и заключается в том, что мы можем, в принципе, включить осознание и его действие в любой момент "спирали" мыслительной деятельности в нормальном бодрствующем состоянии. И это главное! Ведь без осознания нет осмысленных действий, а будет просто рефлексия. Другими словами, не надо ограничивать возможности мыслительной деятельности человека.

Думаю, что описанная организация сознательной деятельности является наиболее рациональной. Если бы сознание контролировало все действия человека, то вряд ли от этого было бы лучше, так как замедление в них было бы нередко существенным, а иногда и опасным. Доведение ряда действий до автоматизма, перенос их на подсознательный уровень (работает система 1), в действительности является большим изобретением Природы!

Перспективы сверхразума

Определим понятие "сверхразум": "Это любой интеллект, значительно превосходящий когнитивные возможности человека фактически в любых областях" [40]. В то же время искусственный интеллект (ИИ) человеческого уровня (ИИЧУ) определяется как "способность освоить большинство профессий, по крайней мере тех, которыми мог бы владеть среднестатистический человек" [40].

В работе [40] проанализированы различные пути к сверхразуму и показано, что два из них представляют особую перспективу, а именно: цифровой интеллект и компьютерное моделирование мозга. Путь улучшения функционирования биологического мозга здесь рассматривать не будем, хотя он бесспорно перспективен. Автор назвал такой подход "от имеющегося" [3, 41].

Рассмотрим сначала цифровой интеллект. При оценке преимуществ его аппаратного обеспечения по сравнению с мозгом человека в работе [40] дан ориентир, как обычно, на число нейронов. Такая оценка сильно занижает возможности мозга. Покажем это. Так, было отмечено ранее, что уровень интеграции мозга человека как объекта электроники корректнее оценивать по числу каналов, а это диапазон $10^{19} \dots 10^{21}$, т. е. на 8—10 порядков больше, чем нейронов. Проведем сравнение. Предлагается, что в ближайшее время уровень интеграции ИС твердотельной наноэлектроники будет около $5 \cdot 10^9$ активных элементов [42]. Итак, чтобы достичь приблизительно уровня интеграции мозга человека в ИС нам потребуется столько же времени (не менее), что и на все развитие твердотельной микро- и наноэлектроники, если оно будет идти согласно закону Мура (что сомнительно), т. е. около 60 лет. Замечу, что это приблизительно соответствует средней оценке (с вероятностью 90 %) специалистов ряда экспертных советов по ИИ времени, требуемого для создания ИИЧУ [40]. Конечно, можно взять не одну ИС, т. е. "компьютерное оборудование масштабируется до гигантских физических размеров" [40]. Так то оно так, но ведь не брать же 10^{10} ИС?!

К сожалению, ситуация еще сложнее. Автор проводил сравнение между мозгом как объектом электроники и ИС твердотельной электроники, и были отмечены очень существенные различия [3—5]. Кроме уровня интеграции, для мозга человека важное значение имеют, по крайней мере, следующие свойства: 1) гибридизация (принципиальную роль играют как минимум два типа процессов: электрические и химические); 2) гибкая системная организация (архитектура); 3) индивидуальность нейронных цепей; 4) пластичность, постоянная модификация нейронных цепей; 5) большое раз-

нообразие элементов электрических (нейронных) цепей, включая активные элементы. Все это характеризует мозг человека как чрезвычайно гибкую и мощную информационную систему. Во всяком случае в твердотельной электронике почти все отмеченные свойства пока недостижимы. В связи с этим в работе [18] отмечалось, что Природа на примере мозга, в сущности, показывает и магистральное направление развития искусственной электроники после закона Мура. Поэтому преимущества цифрового интеллекта [40] весьма сомнительны, т. е. в целом сделана существенная недооценка мозга человека. Косвенно это подтверждают реальные достижения в компьютерной технике, ИИ, которые гораздо скромнее, чем ожидалось.

Рассмотрим второй путь — компьютерное моделирование мозга. Несмотря на перспективность данного подхода, что отмечалось многими авторами (см., например [3, 18, 40, 43]), достигнутые успехи не впечатляют. В частности, в работе [40], ввиду отсутствия в настоящее время полной компьютерной модели мозга, делается неутешительный вывод, что такая модель "вряд ли будет осуществлена в ближайшем будущем". Проблема здесь усугубляется тем, что, к сожалению, нет убедительных теорий и даже более или менее детальных моделей функционирования мозга человека. В связи с предложенными теорией и комплексным иерархическим подходом исследования мозга, основанным на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами и подробно описанным в работах [3, 4, 18], автор все же видит "просвет в конце тоннеля".

Начать целесообразно с моделирования отдельных подсистем мозга (см. ранее), психических функций, стереотипов, шаблонов и т. п. Сделаем оценку сложности нейронной (электрической) цепи, требуемой при реализации, например мыслительной деятельности. Известны оценки по числу нейронов, участвующих в ней [3, 44]. Возьмем нижний предел — 10^5 нейронов [44]. Итак, речь идет оnanoэлектронной схеме с уровнем интеграции не менее 10^{13} . Это, конечно, очень много. И тем не менее речь идет об устройстве электроники (эквиваленте), содержащем 10^4 ИС с уровнем интеграции в 10^9 каждой, т. е. устройстве, которое моделируется с помощью многоуровневых подходов.

Важным преимуществом предложенного комплексного иерархического подхода исследования мозга, как отмечалось в работе [18], является его свойство открытости, возможности комбинации с другими подходами, в частности с коннектомикой, относительно быстрой реализации в первом приближении. Комбинация подходов, особенно на начальных этапах, является, по-видимому, и наиболее перспективной для создания сверхразума.

В то же время при построении систем многоуровневого моделирования мозга человека может быть полезным использование принципов, отмеченных в работе, и ряда ее положений дополнительно к рассмотренным в работах [3, 4].

Заключение

Точное описание сознания человека — невозможно, а допустимо лишь приближенное. В рамках предложенной полной электронной интерпретации функционирования мозга удается построить монистическую материалистическую теорию сознания человека эмерджентного типа. В данной теории становится понятным, что такая мысль, другие психические функции, и устанавливается их материальность. В результате удается также объяснить в целом ряд важных феноменов: творческое мышление, самоизлечение, измененные состояния сознания, свободу воли. Пользуясь проведенной оценкой уровня интеграции мозга как объекта электроники, а также его наиболее существенных преимуществ по сравнению с ИС, удается провести более реалистическую "отрезвляющую" оценку перспектив создания сверхразума. В связи с ней можно сделать вывод о том, что область искусственного интеллекта, выражаясь метафорически, возможно ждет еще не одна "зима" (метафора "зима" используется в работе [40]), несмотря на бесспорную важность продолжения работ в этой области. В то же время предложенный комплексный иерархический подход исследования мозга человека, основанный на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами, представляет перспективу не только для более детального его изучения (в том числе уточнения разработанной теории), но и для создания сверхразума.

Гигантские объемы входящей информации в конечном итоге и привели к созданию фантастической сложности информационной системы в виде мозга человека. Создавая мозг, Природа решила суперсложную оптимизационную комплексную проблему: 1) взаимодействие различных сигналов (механических, оптических, тепловых, химических, электрических и др.); 2) гибкость связей; 3) минимизация энергетических затрат; 4) малые размеры и др. К сожалению, аналогичные проблемы в твердотельной электронике еще очень далеки от действительно оптимальных решений даже по отмеченному в работе комплексу вопросов.

Справедливости ради следует вспомнить, что Природа на создание мозга человека все же потратила миллиарды лет. Кто знает, а может быть и больше? Во всяком случае автор не разделяет теорию Большого взрыва возникновения Вселенной,

считая, что материя, пространство и время, как субстанции ее существования, были всегда. Другой вопрос — о возможности катастрофических изменений по типу Большого взрыва в отдельных областях Бесконечного Мира.

И наконец, понимая все глубже функционирование мозга человека и все более восхищаясь его работой и красотой организации, автор склоняется к мысли, что возможно Природа нашла один из немногих путей (если не единственный). И этот путь — органическая гибридная наноэлектроника, а точнее — "живая электроника"!

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

Список литературы

1. Шеперд Г. Нейробиология: в 2-х т. М.: Мир, 1987.
2. Николлс Дж. Г., Мартин А. Р., Валлас Б. Дж., Фукс П. А. От нейрона к мозгу. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 672 с.
3. Абрамов И. И. Мозг как объект электроники. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 80 с.
4. Abramov I. I. Brain as an object of electronics. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 76 р.
5. Абрамов И. И. Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть II // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 3. С. 45—53.
6. Сигел Д. Внимательный мозг. Научный взгляд на медитацию. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2016. 336 с.
7. Дэвидсон Р., Бегли Ш. Эмоциональная жизнь мозга. СПб.: Питер, 2017. 256 с.
8. Солсо Р. Когнитивная психология. СПб.: Питер, 2006. 589 с.
9. Марчант Дж. Сила самовнушения: Как наш разум влияет на тело: Наука и вымысел. М.: Азбука Бизнес, Азбука-Аттикус, 2016. 352 с.
10. Амен Д. Дж. Мозг и душа. Новые открытия о влиянии мозга на характер, чувства, эмоции. М.: Эксмо, 2012. 304 с.
11. Смит Дж. Псевдонаука и паранормальные явления: Критический взгляд. М.: Альпина нон-фикшн, 2015. 566 с.
12. Психологические методы обретения здоровья: Хрестоматия / Сост. К. В. Сельченок. Минск: Харвест, ACT, 2001. 720 с.
13. Кондрашенко В. Т., Донской Д. И., Игумнов С. А. Общая психотерапия. Минск: Вышшая школа, 2003. 464 с.
14. Pro мозг. М.: РИПОЛ классик, 2013. 640 с.
15. Селье Г. Стресс без дистресса. Рига: Виеда, 1992. 109 с.
16. Сапольски Р. Психология стресса. СПб.: Питер, 2015. 480 с.
17. Бомбар А. За бортом по своей воле. М.: Географиз, 1959. 184 с.
18. Абрамов И. И. Перспективы использования наноэлектроники, наноматериалов и нанотехнологий в исследовании и медицине мозга человека // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 1. С. 49—64.
19. Лечебная электрическая стимуляция мозга и нервов человека / Под общ. ред. Н. П. Бехтеревой. М.: АСТ; СПб.: Сова; Владимир: ВКТ, 2008. 464 с.
20. Перлмуттер Д., Колман К. Здоровый мозг: Программа для улучшения памяти и мышления. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2017. 352 с.
21. Revonsuo A. Consciousness. The science of subjectivity. Hove and New York: Psychology Press, Taylor & Francis Group. 2010. 324 р.
22. Хомская Е. Д. Нейропсихология. М.: Изд-во Моск. университета, 1987. 288 с.
23. Бехтерева Н. П. Магия мозга и лабиринты жизни. М.: АСТ; СПб.: Сова, 2007. 383 с.
24. Метцингер Т. Наука о мозге и миф о своем Я. Тоннель эго. М.: Изд-во АСТ, 2017. 413 с.
25. Иглмен Д. Мозг: Ваша личная история. М.: КоЛибри, Азбука — Аттикус, 2016. 224 с.
26. Хамфри Н. Сознание. Пыльца души. М.: Карьера Пресс, 2014. 304 с.
27. Чиксентмихай М. Креативность. Поток и психология открытий и изобретений. М.: Карьера Пресс, 2013. 528 с.
28. Мозг человека. Как это работает / под общ. ред. П. Абрахамса. М.: АСТ, 2016. 176 с.
29. Саган К. Мир, полный демонов: Наука — как свеча во тьме. М.: Альпина нон-фикшн, 2015. 537 с.
30. Мессинг В. О самом себе // Феномен "Д" и другие. М.: Политиздат, 1991. С. 11—106.
31. Стоянова К. Ванга, или Откровение ясновидящей. М.: Молодая гвардия, 1990. 157 с.
32. Моуди Р. А. Жизнь после жизни: Исследование феномена продолжения жизни после смерти тела. Минск: Префер, 1996. 128 с.
33. Моуди Р. А. Дальнейшие размышления о жизни после жизни. Киев: София, 1996. 224 с.
34. Рубель В. А., Савин А. Ю., Ратников Б. К. Пси-войны: Запад и Восток. История в свидетельствах очевидцев. М.: ПОСТУМ, 2016. 530 с.
35. Сильва Х., Миэл Ф. Метод Сильвы. Управление разумом. Минск: Попурри, 2011. 256 с.
36. Физические поля биологических объектов. Интервью с Ю. В. Гуляевым и Э. Э. Годиком // Вестник АН СССР. 1983. № 8. С. 118—125.
37. Бёртон Р. Разум VS Мозг. Разговор на разных языках. М.: Изд-во "Э", 2016. 304 с.
38. Кэрролл Ш. Приспособиться и выжить! ДНК как летопись эволюции. М.: АСТ: CORPUS, 2015. 384 с.
39. Сэйтл С., Лиленфельд С. О. Нейромания. Как мы теляем разум в эпоху расцвета науки о мозге. М.: Изд-во "Э", 2016. 368 с.
40. Бостром Н. Искусственный интеллект. Этапы. Угрозы. Стратегии. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2016. 496 с.
41. Абрамов И. И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. IV. Квантовомеханические формализмы // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 2. С. 24—32.
42. International technology roadmap for semiconductors 2.0: 2015 Edition. Executive report.
43. Kaku M. The future of the mind: The scientific quest to understand, enhance, and empower the mind. New York: Doubleday Publishers, 2014. 400 р.
44. Иванов-Муромский К. А. Нейроэлектроника, мозг, организм. Киев: Наукова думка, 1983. 175 с.

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

Corresponding author:

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

Human Consciousness, or Possibilities of Electronics. Part II.

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 second part of the work the following phenomena are considered on the basis of the developed theory of consciousness: creative thinking, self-healing, altered states of consciousness, free will, and also prospects of the supermind are analyzed.

According to the theory of human consciousness described in the first part of the work, it becomes clear what are a thought and other mental functions and their materiality is established. As a result, it is possible to understand a number of important phenomena: creative thinking, self-healing, altered states of consciousness, free will. Within the framework of the proposed full electronic interpretation of the brain functioning, it is made an estimation of the level of its integration as an object of electronics. The evaluation is carried out, as it is traditionally done in micro- and nanoelectronics, in accordance with the number of active elements. It turned out that it is about $10^{19} \dots 10^{21}$ active elements for the brain. On this basis, and following from the most important advantages of the brain as an object of electronics determined in comparison with the integrated circuits of solid state electronics, it is possible to make a more realistic and "sobering" forecast of the supermind creation prospects. It is shown that the proposed hierarchical approach to brain research and the interpretation of its functioning represent a perspective not only for a more detailed study of the human brain, but also for creating a supermind.

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

For citation:

Abramov I. I. Human Consciousness, or Possibilities of Electronics. Part II., *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 368–384.

DOI: 10.17587/nmst.20.368-384

Consequences of materiality of a thought and mental functions

From the previous consideration it is visible, that the author adheres to the classical materialistic point of view that "the matter is primary, and the consciousness is secondary". And this means, that consciousness is a function, first of all, of a highly organized matter of a live human brain, which, as a whole, has successfully passed the key stages of its formation and development. The most important factors are: 1) genetics; 2) environment. For the second factor it is necessary to underline especially the influence of the society and social environment.

The proposed theory singles out three types of the operation modes of a brain. The first type of functioning (under an external influence) is characterized by the fact that the signals, incoming from the outside, are converted into the electric ones, which result in a modification of the corresponding neural (electric) circuits. Exactly these modifications reflect the coded information concerning this or that event. Otherwise, memorizing would be impossible, and this is well-known in neurobiology [1, 2]. From the point of view of the described theory, the author does not see any basic difference in the case in point, how the electric signal is initiated from the outside (the first type of the modes) or from within (the second type of the modes). And this means, that in the internal modes of the brain work* (often, the cognitive activity and some other mental functions) a modification of the neural (electric) circuits should also occur. Therefore, a thought and the other mental functions, owing to their materiality, can and should render a reverse (probably not too strong) influence

on the neural circuits of the brain, i.e. modify them, and consequently, change the brain itself. The latest data of the neurobiology prove that a thought can influence a human brain [6, 7]. However, there is no doubt that a live brain (neural circuits) is primary, while a thought is secondary.

Materiality of a thought and of the other mental functions has important consequences and can promote a deeper understanding of, at least, two sorts of activity: creative thinking and healing as a result of self-suggestion (self-healing).

Concerning the creative thinking. I have already pointed out [3–5] that, if we deny a possibility of modification of the neural circuits in the internal operation modes, then our thinking boils down only to "templates" or "stereotypes". Besides, big opportunities were noticed in operation of the nonlinear electric (neural) circuits without their modification, for example, during entry of various incoming signals, due to the flexibility of the bonds and enormous number of the circuits (let us call them "factors without modification"). Moreover, many brain researchers point out that people, especially, when approaching the advanced age, are inclined to think in "stereotypes" or "templates". All this is true.

And, nevertheless, even in the internal operation modes, in particular, in the course of the cognitive activity, when initiation occurs directly in the brain itself, during a passage of an electric signal (signals) via the corresponding set of the neural circuits the modifications occur owing to the materiality of a thought. Although the information stored in each person, first of all, is coded exactly in the topology (morphology) of the neural circuits [3–5], however, their individuality can be influenced by a big number of factors [3–5]. Here are only some of them: new bonds between the neurons; molecular variations of the synapses; synthesis of RNA and proteins leading to the structural changes in the synapses, spines, dendrites,

* I pointed out, that, strictly speaking, most of the operation modes of the brain have a mixed character (the third type of the modes) [3–5]. However, in the considered case the most difficult for understanding are the internal operation modes (the second type).

axons and changes in the cell nucleus, etc. This is connected with the fact that the neural circuits are constantly modified even during a simple decoding of the accumulated information, although the scale of this modification can vary in different people* and, basically, should be insignificant. Thus, in the course of a modification or reorganisation of the electric (neural) circuits the important factors are the changes in the bonds, geometry, conductivity, dielectric permeability, etc., of the corresponding sites of the circuits, which is reached by means of various biochemical processes initiated as a result of the passage of an electric signal (signals). Let us call them the modification factors.

From the psychology it is known, that a creative process can be presented in the form of four stages [8]: 1) preparation; 2) incubation; 3) insight (enlightenment); 4) verification. Quite possible, that it is exactly in the period of incubation that a modification of the neural circuits (modification factors) and/or search for them (factors without modification**) occurs, although the latter, at least in a number of cases, is a faster process. All this can go on at a subconscious level, i.e. the work of only faster system 1 as a result of numerous passages of the signals, when the necessary set of the neural circuits, reflecting a solution to the studied problem, is formed, and the insight occurs as a result of a passage of an electric signal via it. At that, the participation of the neural circuits of the part of the brain responsible for awareness is of principle importance. Otherwise, a solution can be lost, at least, for a certain period of time. Thus, the *process of creative thinking can be influenced by numerous factors, both with modification, and without appreciable modification of the neural circuits, which complicates considerably an analysis of this sort of human activity and makes it very diverse, with a huge number of versions and one of the most complicated ones. The process of creative thinking itself, although it is based on the internal perception by a person of the information coded in the human brain, this information, however, can vary owing to the modification of the neural circuits.*

Concerning self-healing. Unfortunately, the widespread view of self-healing boils down to the following [9]: "... Whenever we talking about health, the traditional science and medicine are inclined to ignore or underestimate the influence of the consciousness on a body... The thought that... an emotional state can prevent illness, while the consciousness possesses "a salutary force ", is considered extremely doubtful". Nevertheless, as is known, the brain is the main control system of the whole body, and consequently, of all human organs. Therefore, for the author it is not surprising that by means of the brain and mental functions, in particular, a modification of the control is possible by this or that sick organ and eventually even its healing. In literature such a recovery is called "recovery as a result of self-suggestion" [9], and the corresponding cases are considered and studied in the behavioural medicine or the psychology of health [7]. From the point of view of the author, at the heart of the psychological methods of healing, first of all, lays materiality of a thought and other mental functions, and also plasticity of the brain, and modification of the neural circuits, in particular. To make it short, it is possible to present the healing scheme in the following way: mental functions (thinking, emotions, etc.) → electric processes → biochemical processes → healing.

What kinds of processes can be stimulated owing to the materiality of a thought and of the other mental functions? They can be quite numerous, therefore, I will enumerate only some of them: 1) modification of the work of the control circuits by this or that organ; 2) modifications of the bonds of the control neural circuits; 3) stimulation of the immune system for increasing the influence on this or that organ or its area (this could be most important in case of the oncological diseases); 4) stimulation of the gene modifications; 5) normalisation and additional generation of the neurochem-

ical substances; 6) stimulation of generation of the substances, which have curing effects; 7) balancing adjustment of the work of the organs (including restoration of the homeostasis) including also the subsystems of the brain itself, etc. Modern data of the neurosciences confirm such possibilities. I will note only certain serious scientific research in the neurobiology concerning this topic and described in the works [6, 7, 9, 10].

Actually, the question is even more complicated. Thus, strengthening of the self-correction is also possible (strictly speaking, it occurs constantly and automatically), when an organ signals to the brain about more serious disorders and deviations in its work from the norms as a result of a feedback and the brain tries independently (subconsciously) to cope with the arisen disorders (the first tool). When the brain cannot cope with a correction in an automatic mode, the additional measures may be required. And in this case the auto-suggestion (the second tool) may not be superfluous, i.e., simply speaking, it can intensify the brain's work in the direction of healing. Most likely, in case of a self-healing we witness a combination of actions of both tools, which are really available to the human brain.

Up till now a number of the research works concerning the self-healing have been done. Of special interest is the widely investigated "placebo effect" (see, for example, [9]). "The phenomenon of recovery after an imaginary treatment is well-known in medicine and is called the placebo effect" [9]. From the point of view of the author of the work [9], "the placebo effect" is an example of "probably, the purest influence of consciousness on an organism".

Today it is possible to consider it proved that certain medicines are not more efficient than the placebo effect. Moreover, it is a kind of tradition to do a preliminary research on the groups of patients, during which in one group the patients get placebo (tablets imitating medicine, etc.), and in another group — a newly proposed medicine. If the efficiency of the latter is not higher than that of placebo, and such cases are quite frequent, the new "medicine" is usually not recommended for manufacture. I should point out, that a number of rather well-known and widespread medicines have not passed successfully such "more scrupulous tests", independent, as a rule, of a manufacturer. The readers can find many examples of "the placebo effect" in history of the B. C. period and nowadays (see, for example, also [9, 11]).

As a result of the undertaken research works concerning "the placebo effect" it was established, that it could have a positive impact on most varied diseases, namely [9]: Parkinson's disease, irritable bowel syndrome, depression, anxiety disorders, addiction, migraines and headaches; it could have an anaesthetising influence, etc. And, nevertheless, "the placebo effect", as it seems to me, is defined not only by the consciousness, but it also depends on various mental functions, including at the subconscious level.

Not less impressive results were obtained due to the use of the eastern meditation practices (see, for example, recent research [6, 7]) of the other empirical practices (methods of E. Kue, J. Silva, J. Kehoe and others [12]) of the modern psychotherapeutic methods (see, for example, [13, 14]) for healing of most varied diseases, including cancer. In general, these successful examples can also be explained by a set of the above-mentioned processes and tools, available for the human brain, sometimes, by their more intensive and addressed action.

However, it is necessary to mention certain possible negative features of the self-healing attempts. Firstly, not every illness of a concrete person can be cured by the given method. And the explanation is trivial enough: there are simply not enough resources, which the brain (organism) of a person has for this purpose, because all of them are limited, while the illness itself may probably be an advanced case. Secondly, the brain is a supercomplex system and it is not so simple to direct signals for modification of the work of the necessary neural circuits. The problem is aggravated by the fact that a patient often does not know the essence of his (hers) illness, and sometimes simply does not even suspect or understand, that he (she) is sick. As a result, the method can have a slow or little effect, which

* This explains well the phenomenon known in psychology as "the false memories".

** Strictly speaking, the influence of the modifications is insignificant.

depends on many internal and external circumstances for the given person. In this connection I should underline in the given method a special importance of belief, persistence and concentration*, which can be ensured by the above-mentioned practices and methods. In this case a positive influence can also be rendered by religion, which is well-known by numerous cases of healing from history. I do not think, that all of them were flights of fancy. Thirdly, in the considered case an extremely negative influence is rendered by the negative stress or distress — "harmful or unpleasant stress" [15]. Modern scientific research works demonstrate, that many human diseases are explained by the influence of the distress [16]. It can render especially bad influence on the brain; up to destruction of the neural circuits. There is also a special term of "nocebo effect" [9], when instead of the organism improvement, the consciousness causes pathological symptoms and changes. The sad examples of that are the deaths of even quite healthy people as a result of the woodoo damnations [9]; after the ship-wrecks in the sea with available quite sufficient means for the rescue (lifeboats, foodstuff, water) [17]; panic, for example, after an earthquake [9]. In these cases a person dies of fear. It is possible to say, that in such situations the brain starts the "self-destruction" mechanism (instead of self-preservation), caused by a strong distress.

Is it possible to intensify the effect of healing by the other artificial methods, except the traditional ones in medicine? I think, yes. Here, again, in connection with the proposed full electronic interpretation of the brain functioning, I see as very promising the use of the possibilities of the electronics and nano-sciences [18]. I in this connection I have already mentioned various methods of electric stimulation of a brain (ESB), namely: electric irritation of a brain; deep stimulation of a brain. However, it is necessary to single out the methods of medical electric stimulation (MES) of the brain and the spinal cord, and also human peripheral nerves with application of "the sparing methods of stimulation", developed under the guidance of Academician N. P. Bekhtereva, by means of which an important success was reached in healing of most varied diseases [19]. A special value of ESB methods consists in the fact that they can stimulate not only creation and modification of the neural circuits of the brain, but they can also destroy the superfluous, pathological circuits. Among the recent works I should note the research works of Doctor K. Tracy in healing of the inflammatory processes by means of electrostimulation of a vagus nerve [9]. Notwithstanding the good prospects of these works, a lot is still should be done for their development (especially the accuracy of stimulation, levels of the excitation signals, etc. [3, 18]) and for their wide introduction in practice.

So, the use of force of consciousness, the materiality of a thought and other mental functions can be an important addition to the traditional methods of the medical treatment. Hence, it would be expedient to realize a complex treatment combining these two approaches, although it is not excluded, that they may not only help, but also "hinder" each other. In particular, it is known, that a number of medicines have a negative influence on the human brain (see, for example, [20]). But, nevertheless, at least, a belief in recovery is desirable!

Altered states of consciousness

The things, which occur in a human brain in the consciousness as a whole are well described in the book [21]: "The flow of our subjective experience flows continuously, following its course; feelings, images, emotions and thoughts merge with each other, gradually overflowing from one into another in changeable patterns and designs". And sometimes the flow can be special. "Unusual sets of the subjective experiences are called "altered states of consciousness"

* These factors, apparently, promote numerous passages of an electric signal via the corresponding neural circuits (NCC, NCMF, see Part I), and, hence, and, probably, to their more radical change in the necessary direction.

[21]. Hereinafter — ASC. Now, a wide spectrum of phenomena are referred to ASC, and the most important and interesting among them are the following [21]: states in a dream; hypnotic states; narcotic intoxication; meditative states; "flow" states; out-of-body experiences; near-death experiences; mystical experiences. Certain PSI phenomena can be regarded as close to the ASC states, namely: clairvoyance, telepathy, etc. Various mental diseases can be basically referred to the pathological (sometimes irreversible) ASC (this question was considered in the work [18]).

So, what are the factors which define all these phenomena? What is common for all of them? Firstly, exactly the individuality of the neural circuits of each concrete person is the predetermining material basis of the subjectivity [18]. Secondly, ASC, including also the mental diseases [18], can be connected to a deviation of the functioning of the neural (electric) circuits from the normal operation modes. I should point out, that the definition of the notion of "normal" in psychology is no less complex, than the definition of the notions of "consciousness" and "ASC", which again is connected with the multifarious character of the corresponding phenomena. However, in psychology this is a question of principle. I should say, that in neuropsychology the notion of "a normal mental function" was introduced long time ago [22]. In general, without this notion it is actually impossible to consider either various mental diseases, or ASC proper. So, *in accordance with the full electronic interpretation I will single out two key factors decisive for ASC, namely: individuality of the neural (electric) circuits of the brain and deviations in their functioning from the normal operation modes.*

Individuality of the neural circuits depends on a great number of factors considered in detail in the works [3—5, 18] and more briefly — above. In the considered case one of the basic ones is the topology of the neural circuits formed for realisation of this or that function. Data of the neurosciences, visualisation, in particular, testify that even the ensembles of the neurons in a concrete person are varied during realisation of one and the same function, and quite often essentially, which underlines the importance of the flexibility of the bonds. In terminology of Academician N. P. Bekhtereva [23] support for the functions is carried out by both rigid and flexible bonds of the neurons.

A question arises: how it is possible to carry out interaction of such grandiose number of the essentially nonlinear active elements, i.e. noted NEMS, electric (neural) circuits, which, apparently (see the last section) make an insignificant part of their total number, for support of a function? At that, they do not hinder each other in supporting the numerous functions which go on in parallel. The author sees only the possibility resulting from the locally-distributed character of the brain as a system, namely: synchronisation of the dynamic interactions of the electric (neural) circuits in various areas of the brain. At that, considering the nonlinearity of the electric circuits, not only the phase, but also the frequency and amplitude characteristics of the electric signals should be important. I should point out, that exactly the amplitude of a signal basically determines the power consumption.

Many experts in the area of the neurosciences underline the importance of the neural synchronisation. Traditionally, in neurobiology they single out the local synchronisation and the phase synchronisation. So, in supporting of the conscious activity a special role is given to the gamma waves (phase synchronisation) (see conversation with Professor V. Singer in [24], [7]).

It is also necessary to pay attention to the facts presented below.

1. The levels of the activity of separate areas of the brains of different people can differ considerably in case of the same actions and reach the level of "three thousand percent" [7].

2. Even serious mental diseases can be caused by the insignificant, as it would seem at the first sight, deviations, in particular, "the people with depression lacked not in stimulation, but support for the activity of the renumeration system in the prefrontal cortex" [7].

3. Important data are received by means of MES, namely: "Repeated stimulations of one and the same zone (structure) of the brain with the identical parameters depending on its initial state can cause

reactions, not only differing by the intensity and signs, but also qualitatively new" [19].

The above enumerated data are quite enough to understand, that the question concerning the deviation of the work of the neural (electric) circuits from the normal modes is not less complicated, and depends on a concrete person, and, moreover, on the time moment. This underlines the dynamic character of the brain both in its work and in its development. Thus, even normal mental functions can be supported in each person by a different set of the neural circuits, and vary from case to case, and for various people the activation level can differ considerably. In this connection it seems to be promising to establish a databank with "a set of portraits of the basic psychological functions" of a healthy young person, for example, by means of visualisation, and in future with advancing of the age to be guided by this "normal set", and here also an individual approach is preferable.

And, nevertheless, the recent data of the neurobiology testify that the brain reconstructs the reality (see, for example, [24–26]). The author shares completely this point of view [3, 4] and consequently considers, that *all ASC are connected with various sorts of changes, distortions and disorders in this reconstruction in the human brain, as a rule, characterised by essential displays*.

According to the given point of view, it is possible to single out the dominating, characteristic reasons and properties of those or other ASC. We will discuss briefly some of the above ASC, because this question deserves a separate paper.

As an analysis of the available data shows, we can connect meditative and "flow" states, first of all, with an intensification of the synchronization. In particular, the research of the brains of the meditating Tibetan Buddhist monks by means of visualisation tools allowed to receive a number of important results [7]. The most interesting of them are the following [7]: 1) intensification of the activity of the gamma waves, at that, the process increased gradually, which testified to the necessity of time for the synchronisation; 2) "the monks with the greatest experience of meditation demonstrated the greatest gamma synchronism (both in the initial state and during the meditation)"; 3) in the areas of attention "the activity grew and increased with the augmenting quantity of the hours, which the meditating monk devoted to the practice, but then fell, when the quantity of the hours started to exceed twenty five thousand or about that". The latter means, that the activity of certain areas of the brain may not only increase, but also fall, which testifies to the more economic operation modes of the brain of the more experienced meditating monks. Certainly, a lot depends also on a concrete form and the meditation practice [7, 21]. Apparently, such phenomena occur in the states of "the flow" of the creatively thinking people [27].

Among the known reasons for a dream the author singled out the following [3–5]: 1) physiological ones; an organism, including its brain, requires rest, restoration of the necessary substances, etc.; 2) possibility of processing and systematization of the newly coming and the already stored information including its fixing (consolidation), simply speaking, an additional modification of the neural circuits occurs. The means of visualisation allow us to obtain important information. "A functional tomography of a brain shows, that during the dreams, in the cortex, the visual (occipitotemporal), emotional (tonsil) and motor areas (frontal cortex) are active, while the areas connected with the critical thinking and self-consciousness (in the prefrontal cortex) are deactivated" [21]. On one side, this testifies to a transition of the brain during a dream to a more economic operation mode of system 1 (the lucid dreams, perhaps, are exception), and on the other hand, actually shows how system 1, i.e. subconsciousness, works. However, we should have in mind, that thus the limbic system responsible mainly for emotions is most active [28]. As a result, apparently, system 1 is characterised by more "chaotic passage of an electric signal via the neural circuits of the brain" [3–5]. Therefore a conclusion was made that "dreams are a chaotic mode of the brain work", although it was noticed, that "some cognitive acts can have a close "pseudo-chaotic" character" [3–5]. In this connection, no wonder, that the practice of the attentive awareness

[6], characteristic for meditation, systematises the work of thinking and makes it more directed, which often takes place also for "the flow" states.

Although, in general, the author shares the critical point of view on PSI phenomena (see, for example, [11, 29]), however, I do not adhere to the extremely negative view on this problem, up to a full negation of the phenomena. I think, that many PSI phenomena, the clairvoyance and telepathy in particular, can often be explained by those or other features of the modes of functioning of a human brain, i.e. their correct interpretation is important.

First of all, the main problem with explanation of such phenomena is the fact that the lion's share of the work of the brain in these cases proceeds at the subconscious level. This explains their mysteriousness.

The clairvoyance and telepathy, apparently, are connected with strengthening of the prognostic possibilities of a human brain. This can be caused by the following circumstances: 1) increase of the sensitivity of the sensor systems; 2) sharpening of the sensitivity of the neural circuits to the external and/or internal signals; 3) flexibility of the bonds during the associative processing of information in the neural circuits available in the brain. The first and the second points mean that the neural circuits become susceptible even to the subthreshold signals, i.e. not susceptible for most people or in many situations for a concrete person. So, what can cause such a sharpening?

The author sees the following numerous possibilities contributing to this: rituals, meditation, mystical states and other ASC, states of strong stress (and not only distress), etc. Interesting to note that the biographies of the outstanding telepathist and clairvoyant of the recent time — W. Messing and Vanga — testify that their extrasensory abilities appeared after their great distresses on the verge of death [30, 31]. The people, who survived the state of the clinical death, sometimes acquire similar abilities (or they are sharpened) [32–34]. These sharpenings of the sensitivity of the neural circuits, apparently, are caused mainly by a variation of the biochemical processes proceeding in them, or, probably by their morphological changes. Their organisms somehow try to adapt to the qualitatively new states caused by great distresses.

At last, there can simply be outstanding predictors possessing such abilities from their births, i.e. genetically predisposed to this sort of activity. After all, if there are outstanding scientists, politicians, sportsmen, etc., then why not outstanding predictors? The history knows numerous facts of ingenious guesses, forecasts, etc. The epigraph to this work says quite enough already. The more so, it is well-known that the brain of each person is constantly engaged in forecasts, i.e. it practices them regularly. Actually, forecasting is one of the basic functions of the brain (see above). I do not see any serious obstacles to development of such abilities (see, for example, [34, 35]).

At the same time, a telepathist makes a forecast using the information available about another person or/and coming from him (her). And here, apparently, the known various physical fields can be important. In literature they are often called "biofield". Thus, Academician Yu. V. Gulyaev noticed, that "a complex picture of the physical fields appears around any biological object in the course of its vital activity. Their distribution in space and change in time bear important biological information, which can be used" [36]. Apparently, exactly this information is, at least partially, used by a telepathist for his (hers) forecasts, i.e. for "reading of the thoughts". Besides, the specific features of his (hers) associative processing of the information can also be important.

Unfortunately, these phenomena are frequently unreliable, casual and, as a rule, have an approximate character, which usually demands their additional decoding. The latter is done especially well, when the "predicted", "forecasted" event has already occurred, i.e. post factum. Simple coincidences, swindles, etc. are also not so rare. Usually, this is also marked in serious works on the topic of the PSI phenomena (including others). The verge between the serious research works, experiments and charlatanism is often very thin. After

all, these phenomena are very "slippery" (unreliable), which is a common thing and no wonder for the forecasts, even the collective ones.

In any case the episodes of "clairvoyance" and "telepathy", as well as of many other PSI phenomena, are the products of the brain activity of concrete persons in concrete situations, and not of any other wordly forces, mythical fields. In this connection it is possible to consider the outstanding clairvoyants and telepaths as "the geniuses of the sharpened intuition".

The most difficult for explaining seemed to be the following ASC: out-of-body experiences (OBE) and near-death experiences (NDE). Five basic elements are characteristic for NDE [21] (more than fifteen characteristic elements [32, 33]), one of which is OBE. OBE means experiences of a person which have a very strong impression first of all upon him (her) and are often used as the obvious proof of immateriality of the consciousness, which in these cases ostensibly separates from a physical body. The author does not share this point of view.

OBE and NDE are ASC in which there are obvious disorders of reconstruction of the reality in the human brain in the corresponding situations and characterised by hallucinogenic experiences. So, what causes OBE and NDE?

Apparently, in case of OBE and NDE there are rigorous disorders of the biochemical processes in a human brain, which lead to serious deviations in the work of the neural circuits, so, the causes are the physiological changes in an organism.

In recent time these phenomena attract more and more attention. I will present the most important and at the present moment established authentic scientific facts, namely:

1. In neurology and psychiatry the experiences similar to OBE, have been known for a long time and are called autoscop (see, for example, [21, 24]).

2. OBE can appear under various life circumstances: excessive physical and intellectual loads, dangerous situations (not necessarily NDE) [21].

3. In case of OBE often there are deviations (and also as a result of damages) in the work of the parietotemporal cerebral cortex, etc. [21, 24].

4. It was demonstrated, that OBE can be caused artificially "by the convulsive activity, stimulation of the brain and certain psychotropic substances" [37].

5. Virtual OBE, caused by unusual and inconsistent information concerning the position of a human body participating in the experiment, are also possible [24].

The important research works concerning NDE described in the work [21] confirm the connection with the damages in certain areas of the brain, at that, it is pointed out, that "all these structures are often appear damaged in the patients, who survived a cardiac arrest, but restored completely" [21]. Such hallucinations, similar to NDE, appear during the centrifuge tests, when blood flows back from the brain [11].

And at last, another very important factor noted by Doctor R. Moudi, one of the pioneers of the research of NDE, [32], is the following: "Notwithstanding a big variety of the circumstances connected with the approach of death, and also types of people, experiencing it, the stories about the events occurring during this moment have an amazing similarity. It is so great, that it is possible to single out about fifteen elements, which again and again are encountered in a large number of stories". This similarity, which is common for absolutely different people, as it seems to me, confirms once again that both in case of OBE and of NDE there are characteristic sequences of the physiological changes in the brain (there are common regularities), fortunately, in the considered cases they are reversible in many respects. Exactly these physiological changes lead to the approximately identical specific operation modes of the neural circuits caused by the corresponding biochemical changes in the human brain. However, it is necessary to point out the qualitative changes in the lives of the people after NDE, noted in many researches (see, for example, [32–34]), i.e. these changes are not traceless.

Concerning a free will

The author pointed out: "Exactly the huge volumes of the incoming information are a kind of locomotive (initiator) of the evolution" [3]. The natural selection of the Darwinian theory can be considered the basic method for its practical realisation. At the same time the information imprint of the evolution of the live organisms is "the DNA annals" of the molecules [38], which actually code the program for creation of the corresponding organism. And the human consciousness is connected with the information, and in effect the consciousness appeared and was intended for its better processing, but, unfortunately, this is not always achieved in practice.

Let us consider in detail another complicated question, one of the basic ones connected with the consciousness, namely: "a free will".

The question of "a free will" is directly connected with the specificity of the work of system 2 considered earlier. In particular, the version presented in fig. 2, *a* of Part I, in effect, also caused an acute discussion in the neurobiology (experiments of B. Libet, J.-D. Hayes, etc.), i.e. action is first, and then comes awareness. Surprisingly, these experiments led many specialists, including the well-known neuroscientists, to the conclusion that "a free will" did not exist. This is not an idle question, because behind this negation there is a possibility of justification of and impunity for the crimes, including serious ones (see, for example, [39]).

The main error in such reasonings is that another version of the cognitive activity presented in fig. 2, *b* of Part I is not taken into account, i.e. first we simply think, prepare for action, and also that the process of thinking can be presented as an event "going via a spiral", because usually it is not limited to one "turn", one cycle. The freedom of choice or "free will" consists exactly in the fact that, in principle, we can turn on the awareness and its action at any moment of "the spiral" of the cognitive activity in a normal awake state. And this is the most important thing! After all, without an awareness there can be no intelligent actions, it will be a simple reflexion. In other words, we should not limit the possibilities of the human cognitive activity.

I think, that the described organisation of the conscious activity is the most rational one. If the consciousness could control all the human actions, it would hardly be better, because a delay in them would be quite often essential, and sometimes even dangerous. Introduction of automatism in some actions, their transfer to the subconscious level (system 1 works) is, indeed, a big invention of Nature!

Prospects of the supermind

Let us define the notion of "the supermind". "This is any intellect considerably surpassing the cognitive possibilities of a person actually in any area" [40]. At the same time the artificial intellect (AI) of the human level (AIHL) is defined as "the ability to master most trades, at least, those, which are accessible to an average person" [40].

The work [40] presents analysis of various ways to the supermind and shows, that two of them have special prospects, namely: digital intelligence and computer modelling of the brain. We will not consider here a way for improvement of functioning of the biological brain, although, undoubtedly, it has good prospects. The author calls such an approach "from available" [3, 41].

First, let us consider the digital intelligence. In estimation of the advantages of its hardware in comparison with a human brain in the work [40], a reference point was given, as usual, as the number of the neurons. Such estimation underestimates greatly the brain possibilities. We will show that. So, as it was mentioned earlier, the level of integration of the human brain as an object of electronics would be more correct to estimate by the number of the channels, and it is the range of $10^{19} \dots 10^{21}$, i.e. by 8–10 orders more than that of the neurons. Let us present a comparison. It is expected, that in near future the level of integration of IC of the solid state nanoelectronics will be about $5 \cdot 10^9$ of the active elements [42]. So, in order to reach approximately the level of integration of a human brain in IC we will need not less time than all the development of the solid state micro- and nanoelectronics, if it goes according to Moore's law (which is

doubtful), i.e. about 60 years. I should say, that this approximately corresponds to the average estimation (with probability of 90 %) done by the specialists of certain AI advisory councils of the time demanded for development of AIHL [40]. Certainly, we can take more than just one IC, i.e. "the computer hardware can be scaled up to huge physical sizes" [40]. This is quite so, but after all, can we take 10^{10} of IC?

Unfortunately, the situation is even more complex. The author compared a brain as object of electronics and IC of the solid-state electronics, and underlined very essential distinctions [3—5]. Besides the integration level, at least the following properties are of great importance for a human brain: 1) hybridization (the main role is played by at least two types of the processes: electric and chemical ones); 2) a flexible system of organisation (architecture); 3) individuality of the neural circuits; 4) plasticity, constant modification of the neural circuits; 5) a big variety of the elements of the electric (neural) circuits, including the active elements. All this characterises a human brain as an extremely flexible and powerful information system. Anyway, in the solid state electronics almost all the above mentioned properties are unattainable so far. In this connection in the work [18] it is noted, that indeed on the example of the brain the Nature shows also the main direction for development of the artificial electronics after the Moore's law. Therefore, the advantages of the digital intelligence [40] are rather doubtful, i.e. the human brain as a whole was essentially underestimated. Indirectly this is proved by the real achievements in the computer technologies, AI, which are much more modest, than they were expected.

Let us consider the second way — computer modelling (simulation) of the brain. Notwithstanding the good prospects of the given approach, underlined by many authors (see, for example, [3, 18, 40, 43]), the achieved success is not impressive. In particular, in the work [40], in view of absence of a full computer model of a brain now, a deplorable conclusion is made that such a model "will hardly be implemented in near future". Here the problem is aggravated by the fact that, unfortunately, there are no convincing theories and even there are no more or less detailed models of functioning of the human brain. In connection with the proposed theory and the complex hierarchical approach to the research of the brain, based on a multilevel modelling in a combination with the experimental methods, described in detail in the works [3, 4, 18], the author, nevertheless, sees "light at the end of the tunnel".

It would be expedient to begin with modelling of separate subsystems of the brain (see above), the mental functions, stereotypes, templates, etc. We will estimate the complexity of the neural (electric) circuit demanded for realisation, for example, of the cognitive activity. Estimations by the number of the neurons participating in it are known [3, 44]. We will take the bottom limit — 10^5 of the neurons [44]. So, we are talking about a nanoelectronic circuit with the level of integration not less than 10^{13} . This, of course, is very much. Nevertheless, we are talking about an electronic device (equivalent) containing 10^4 of IC with the level of integration of 10^9 of each one, i.e. a device, which is modelled by means of the multilevel approaches.

An important advantage of the proposed complex hierarchical approach for research of the brain, as it was pointed out in [18], is its property of openness, possibility of combination with the other approaches, in particular with the connectomics, a relatively fast realisation in the first approximation. A combination of the approaches, especially at the initial stages, apparently, is most promising for development of the supermind. At the same time, during construction of the systems of the multilevel modelling of a human brain, it can be useful to employ the principles noted in the work, and some of its positions in addition to the ones considered in the works [3, 4].

Conclusion

A precise description of the human consciousness is impossible, and only an approximated one is admissible. Within the framework of the proposed full electronic interpretation of the brain functioning it is possible to construct a monistic materialistic theory of the human

consciousness of the emergent type. In the given theory it becomes clear, what a thought is and what the other mental functions are, and their materiality is established. As a result, it is also possible to explain as a whole a number of important phenomena: creative thinking, self-healing, altered states of consciousness, free will. Using the undertaken estimation of the level of integration of the brain as an object of electronics, and also of its most essential advantages in comparison with IC, it is possible to undertake a more realistic and "sobering" estimation of the prospects for creation of the supermind. In connection with this it is possible to draw a conclusion that the area of the artificial intelligence, metaphorically saying, will probably have to expect more than one "winter" (the "winter" metaphor is used in the work [40]), despite the indisputable importance of continuation of the works in this area. At the same time, the proposed complex hierarchical approach to the research of the human brain, based on a multilevel modelling in combination with the experimental methods, presents good prospects not only for its more detailed studying (including specification of the developed theory), but also for development of the supermind.

Finally, the huge volumes of the incoming information also resulted in creation of the information system of a fantastic complexity in the form of the human brain. By creating the brain, the Nature has solved a supercomplicated optimisation complex problem: 1) interaction of various signals (mechanical, optical, thermal, chemical, electric, etc.); 2) flexibility of the bonds; 3) minimisation of the power consumption; 4) small dimensions, etc. Unfortunately, in the solid state electronics similar problems are still very far from their really optimal solutions, even in the complex of the questions touched upon in the work.

For the sake of justice we should recollect, that Nature has spent billions of years for creation of the human brain, and maybe even more, who knows? Anyway, the author does not share the theory of the Big Bang, which gave birth to the Universe, considering, that the matter, space and time as the substances of its existence, have always existed. A possibility of the catastrophic changes like the Big Bang in separate areas of the Infinite World is another question.

And, at last, proceeding from his more profound understanding of the functioning of the human brain and his greater admiration of its work and the beauty of its organisation, the author is inclined to think, that, probably, Nature has found one of the few ways (if not the only one) and this way is the organic hybrid nanoelectronics or "live electronics", to be more exact!

The author is pleased to express his sincere gratitude to his disciples N. Kolomeitseva, I. Romanova and I. Shcherbakova for the preparation of the manuscript of his work for publishing.

References

1. Shepherd G. M. *Neurobiology*, New York, Oxford University Press Inc., 1983.
2. 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.
3. Abramov I. I. *Mozg kak obekt jelektroniki*. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 80 p. (in Russian).
4. Abramov I. I. *Brain as an object of electronics*. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 76 p.
5. Abramov I. I. *Mozg — obekt organicheskoy gibridnoy nanojelektroniki, ili vzgljad so storony*. Chast' II, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2013, no. 3, pp. 45–53 (in Russian).
6. Siegel D. J. *The mindful brain. Reflection and attunement in the cultivation of well-being*, New York, London, W. W. Norton & Company, 2007.
7. Davidson R. J., Begley S. *The emotional life of your brain*, New York, Penguin, 2012.
8. Solso R. L. *Cognitive psychology*. 6-th ed. Boston, Allyn & Bacon, 2001.

9. **Marchant J.** Cure: *A journey into the science of mind over body*, New York, Crown Publishers, 2016.
10. **Amen D. G.** *Healing the hardware of the soul*, New York, London, Free Press, 2002.
11. **Smith J. C.** *Pseudoscience and extraordinary claims of the paranormal. A critical thinker's toolkit*, Wiley—Blackwell, 2010.
12. **Psichologicheskie metody obretenija zdorov'ja:** Hrestomatija, Sost. K. V. Sel'chenok. Minsk, Moscow, Harvest, AST, 2001, 720 p. (in Russian).
13. **Kondrashenko V. T., Donskoy D. I., Igumnov S. A.** *Obshchaja psihoterapija*, Minsk, Vyshjejsjaja shkola, 2003, 464 p. (in Russian).
14. **The mind. A user's guide**, Consultant ed. R. Persaud, Royal College of Psychiatrists, 2007.
15. **Selye H.** *Stress without distress*, New York, Penguin, 1975.
16. **Sapolsky R. M.** *Why zebras don't get ulcers*, New York, Henry Holt and Company, 2004.
17. **Bombard A.** *The voyage of the Heretique*, New York, Simon and Schuster, 1953.
18. **Abramov I. I.** Prospects of nanoelectronics, nanomaterials and nanotechnologies in research and medicine of the human brain, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 49–64.
19. **Lechebnaja jelektricheskaja stimulacija mozga i nervov cheloveka**, Ed. N. P. Bektereva. Moscow, AST; Saint-Petersburg: Sova; Vladimir: VTK, 2008. 464 p. (in Russian).
20. **Perlmutter D., Colman C.** *The better brain book*, New York, Penguin, 2005.
21. **Revonsuo A.** *Consciousness. The science of subjectivity*, Hove and New York, Psychology Press, Taylor & Francis Group, 2010, 324 p.
22. **Homskaya E. D.** *Nejropsihologija*, Moscow, Izd-vo Mosk. universiteta, 1987, 288 p. (in Russian).
23. **Bektereva N. P.** *Magija mozga i labirinty zhizni*, Moscow, AST; Saint-Petersburg, Sova, 2007, 383 p. (in Russian).
24. **Metzinger T.** *The ego tunnel: The science of the mind and the myth of the self*, New York, Basic Books, 2009.
25. **Eagleman D.** *The brain. The story of you*, New York, Pantheon Books, 2015.
26. **Humphrey N.** *Soul dust. The magic of consciousness*, Princeton University Press, 2011.
27. **Csikszentmihalyi M.** *Creativity. Flow and the psychology of discovery and invention*, New York, Harper Perennial, 1997.
28. **How the brain works**, ed. by P. Abrahams, Bright Star Publishing Co., 2015.
29. **Sagan C.** *The demon-haunted world. Science as candle in the dark*, New York, Ballantine Books, 1996.
30. **Messing V.** *O samom sebe, Fenomen "D" i drugie*, Moscow, Politizdat, 1991, pp. 11–106. (in Russian).
31. **Stoyanova K.** *Vanga, ili Otkroenie jasnovidjashhej*, Moscow, Molodaja gvardija, 1990, 157 p. (in Russian).
32. **Moody R. A.** *Life after life*, New York, MBB, Inc., 1975.
33. **Moody R. A.** *Reflections on life after life*, New York, Bantam Books, 1977.
34. **Rubel V. A., Savin A. Yu., Ratnikov B. K.** *Psi-vojny: Zapad i Vostok. Istorija v svidetel'stven ochevidcev*, Moscow, POSTUM, 2016. 530 p. (in Russian).
35. **Silva J., Miele P.** *The Silva mind control method*, New York, Simon and Schuster, 1977.
36. **Fizicheskie polja biologicheskikh obektov.** Interv'ju s Ju. V. Gujaevym i Je. Je. Godikom. Vestnik AN SSSR. 1983, no. 8, pp. 118–125 (in Russian).
37. **Burton R. A.** *A skeptic's guide to the mind: What neuroscience can and cannot tell us about ourselves*, New York, St. Martin's Griffin, 2013.
38. **Carroll S. B.** *The making of the fittest. DNA and the ultimate forensic record of evolution*, New York, London, W. Norton & Company, 2006.
39. **Satel S., Lilienfeld S. O.** *Brainwashed: The seductive appeal of mindless neuroscience*, New York, Basic Books, 2013.
40. **Bostrom N.** *Superintelligence. Path, dangers, strategies*, New York, Oxford University Press, 2014.
41. **Abramov I. I.** Problemy i principy fiziki i modelirovaniya pribornyh struktur mikro- i nanojelektroniki. IV. Kvantovomechanicheskie formalizmy, *Nano- and microsystemnaya tekhnika*, 2007, no. 2, pp. 24–32 (in Russian).
42. **International** technology roadmap for semiconductors 2.0: 2015. Edition. Executive report.
43. **Kaku M.** *The future of the mind: The scientific quest to understand, enhance, and empower the mind*, New York, Doubleday Publishers, 2014. 400 p.
44. **Ivanov-Muromsky K. A.** *Neuroelektronika, mozg, organizm*, Kiev, Naukova Dumka, 1983. 175 p. (in Russian).

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

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

Сдано в набор 21.04.2018. Подписано в печать 23.05.2018. Формат 60×88 1/8. Заказ МС0618. Цена договорная
 Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье В. Н. Серова, Л. Ю. Фетисова, Ю. К. Фетисова, Д. В. Чашина
«МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ПОСТОЯННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ КОМПЕНСАЦИОННОГО ТИПА С РАСПРОСТРАНЕННЫМ ЛИНЕЙНЫМ ДИАПАЗОНОМ»

V. N. Serov, L. Yu. Fetisov, Yu. K. Fetisov, D. V. Chashin
«MAGNETOELECTRIC COMPENSATION TYPE SENSOR OF PERMANENT MAGNETIC FIELDS WITH EXTENDED LINEAR RANGE»

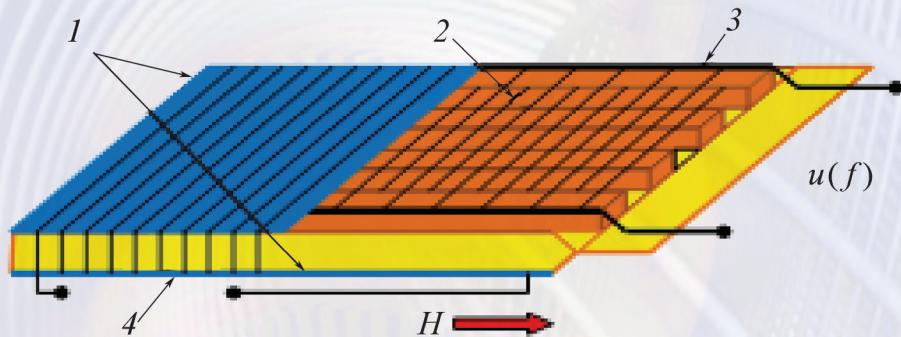


Рис. 1. Чувствительный элемент на основе магнитоэлектрической структуры metglas – ПВК – metglas:
 1 – пленки metglas; 2 – PZT-волокна; 3 – встречно-штыревые преобразователи; 4 – возбуждающая катушка

*Fig. 1. Sensitive element based on the magnetoelectric structure of metglas – PAC – metglas:
 1 – metglas films; 2 – PZT fibers; 3 – interdigital transducers; 4 – excitation coil*

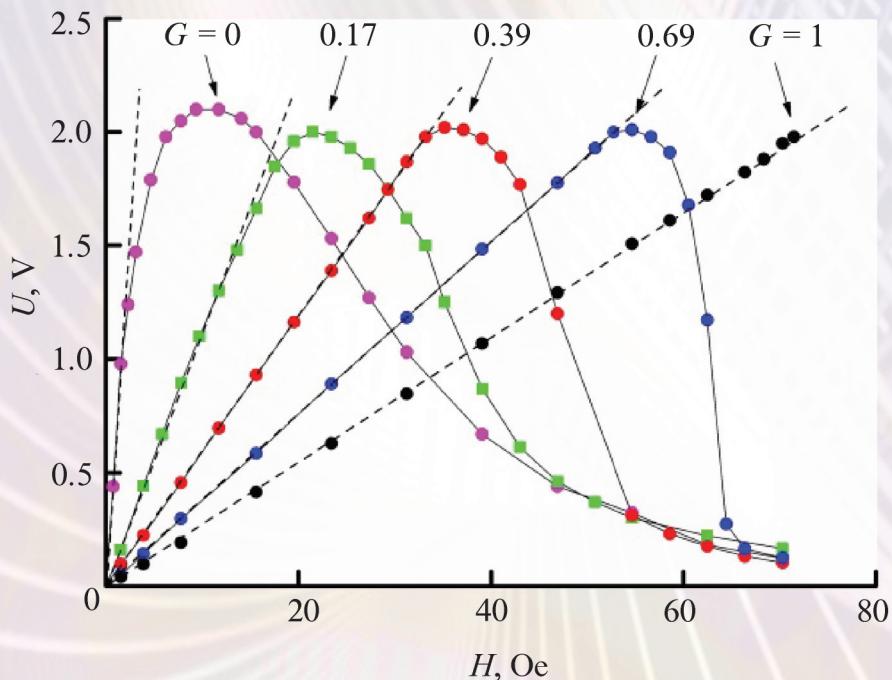
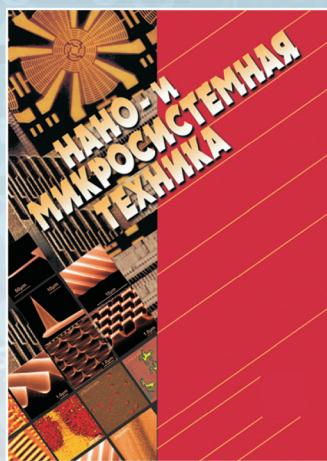


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения U датчика компенсационного типа от магнитного поля H при различных коэффициентах обратной связи G :
 точки – данные измерений; штриховые линии – линейная аппроксимация

*Fig. 4. Dependence of the output voltage U of the compensation type sensor against the magnetic field H at different feedback factors G :
 points – measurement data; dashed lines – linear approximation*

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» выпускает научно-технические журналы



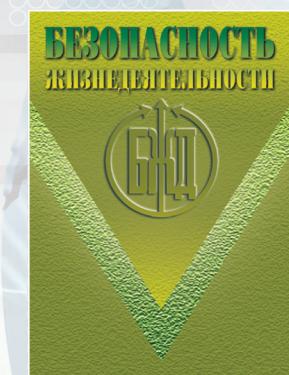
Ежемесячный междисциплинарный теоретический
и прикладной научно-технический журнал

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 жизнедеятельности

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

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



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:

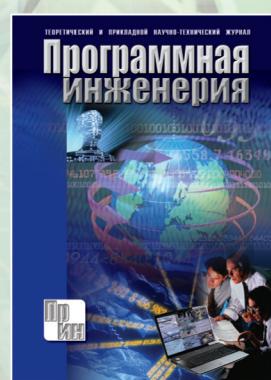
«Роспечать» – 79492;

«Пресса России» – 27848

Теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние 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