

№ 7(156) **♦** 2013

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России и в систему Российского индекса научного цитирования

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В. Шур М. (США)

Редакционный совет:

Аристов В. В. Асеев А. Л. Волчихин В. И. Гапонов С. В. Захаревич В. Г. Каляев И. А Квардаков В. В. Климов Д. М. Ковальчук М. В. Нарайкин О. С. Никитов С. А. Рыжий В. И. (Япония) Сауров А. Н. Серебряников С. В. Сигов А. С. Стриханов М. Н. Чаплыгин Ю. А. Шахнов В. А. Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия: Абрамов И. И. (Республика Беларусь) Андреев А. (Великобритания) Андриевский Р. А. Антонов Б. И. Астахов М. В. Быков В. А. Горнев Е. С Градецкий В. Г. Гурович Б. А. Кальнов В. А. Карякин А. А. Колобов Ю. Р Кузин А. Ю. Мокров Е. А. Панич А. Е. Панфилов Ю. В. Петросянц К. О. Петрунин В. Ф. Пожела К. (Литва) Путилов А. В. Пятышев Е. Н. Сухопаров А. И. Телец В. А. Тимошенков С. П. Тодуа П. А. Шубарев В. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ _

Издается с 1999 г.

39

МОЛЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Заблоцкий А. В., Вирюс А. А., Каминская Т. П., Коровушкин В. В., Кузин А. Ю., Степович М. А., Тодуа П. А., Филиппов М. Н., Шипко М. Н. Локальные характеристики прецизионных сплавов Fe ₃ (SiAl) после магнитно-импульсной	
обработки	2
Хлопов Б. В., Самойлович М. И., Бовтун В. Исследование эффекта мультипликации электромагнитных полей в устройствах бесконтактного стирания информации с электронных носителей с использованием нанокомпозитов на основе опаловых матриц	6
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ	
Амеличев В. В., Благов Е. В., Гаврилов Р. О. Технологические особенности создания беспроводной магниторезистивной МЭМС контроля параметров движения	13
ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ	
Белогуров Е. А., Горох Г. Г., Таратын И. А., Хатько В. В. Чувствительный элемент кольцевого гироскопа на основе нанопористого анодного оксида алюминия	16
Сергеева А. С., Плешков Д. Н., Горин Д. А. Микро- и наноструктурированные	
фотоэлектрические преобразователи	20
Кернбах С. Исследование проникающей способности светодиодного и	
лазерного излучения. Часть 2	28

Платонов В. В., Генералов С. С., Смехова М. И., Амеличев В. В., Поломошнов С. А. Электростатический МЭМС-ключ на структуре кремний—стекло 43 **БИОЭЛЕКТРОНИКА** Мосин О. В., Игнатов И. И. Природный фотопреобразующий фотохромный

Батурин А. С., Спиридонов М. В., Негров Д. В., Кузин А. А. Сосредоточенный

выходной резонатор микроклистрона миллиметрового диапазона.

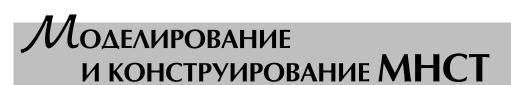
белковый наноматериал бактериородопсин из пурпурных мембран галобактерии 47 55

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайте журнала (http://novtex.ru/nmst/) и научной электронной библиотеки (http://elibrary.ru). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 по 2011 г. в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА:

по каталогу Роспечати (индекс 79493); по каталогу "Пресса России" (индекс 27849) в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10) Адрес для переписки: 107076 Москва, Стромынский пер., д. 4 e-mail: nmst@novtex.ru

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2013



УДК 627.78 + 669.15

А. В. Заблоцкий $^{1, 2}$, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.,

А. А. Вирюс³, канд. техн. наук, науч. сотр.,

Т. П. Каминская⁴, канд. техн. наук, доц., науч. сотр.

В. В. Коровушкин⁵, д-р геол.-мин. наук, проф.,

А. Ю. Кузин², д-р техн. наук, проф., зам. директора,

М. А. Степович^{6, 7}, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф.,

П. А. Тодуа^{1, 2}, д-р физ.-мат. наук, проф., ген. директор,

М. Н. Филиппов^{1, 2, 8}, д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр.,

М. Н. Шипко⁶, д-р техн. наук, проф., зам. директора

¹ Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская обл.;

² Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума, Москва;

³ Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка, Московская обл.;

⁴ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова;

⁵ Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Москва;

⁶ Ивановский филиал Российского государственного торгово-экономического университета;

⁷ Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского;

⁸ Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Москва

ЛОКАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ СПЛАВОВ Fe₃(SiAl) ПОСЛЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Поступила в редакцию 13.11.2012

Методами растровой электронной, атомной силовой микроскопии, мессбауэровской спектроскопии и некоторыми другими экспериментально изучено влияние слабых (10...100 кА/м) низкочастотных (10...20 Гц) импульсных магнитных полей на локальные характеристики сплавов $Fe_3(SiAl)$.

Ключевые слова: растровая электронная микроскопия, атомная силовая микроскопия, прецизионные сплавы, магнитно-импульсная обработка

Введение

Прецизионные сплавы на основе системы Fe— Si—Al находят широкое применение в микросистемной технике. в частности в узлах точной механики, работающих в динамическом режиме, а также в видеозаписывающих устройствах. Например, в аппаратуре видеозаписи широко используется прецизионный сплав Fe₃(SiAl) (сендаст), имеющий состав (весовые %): 9,4 Si, 5,2 Al, остальное железо. Материал обработан по стандартной технологии в вакууме: термообработка при 800 °C в течение 2 ч, затем охлаждение со скоростью 50 °C/ч до 200 °C, далее охлаждение на воздухе. Его достоинствами, выгодно отличающими от других сплавов системы Fe-Si-Al, являются высокие значения электромагнитных параметров: начальной магнитной проницаемости ($\mu_0 = 35~000$, $\mu_{\text{max}} = 116\ 000...180\ 000)$ и остаточной индукции $(B_{\rm s} = 0.1 \, \text{Тл})$. Такой сплав должен обеспечивать высокую надежность и долговечность устройств, а следовательно, иметь высокую износостойкость и низкую склонность к хрупкому разрушению. Однако ввиду высокой склонности этих материалов к хрупкому разрушению, в приборах может происходить неконтролируемое разрушение или ухудшение качества узлов этих устройств в процессе их эксплуатации. Поэтому снижение склонности таких материалов к хрупкому разрушению является весьма актуальной проблемой.

Широко известно о термической и радиационной обработке металлов и сплавов в целях повышения их эксплуатационных свойств. В меньшей степени изучены возможности использования для решения этой задачи импульсных электрических и магнитных полей. Несомненный интерес представляет и сравнение возможностей указанных методов.

Анализ современного состояния и возможностей повышения пластичности материалов, находящихся в хрупком состоянии, в результате импульсного магнитного воздействия проведен в работе [1]. На основе имеющихся литературных данных и результатов собственных исследований [2—4] сделан вывод о том, что слабое низкочастотное импульсное магнитное поле, изменяя спиновое состояние частиц, может ускорить процессы реконструкции решетки, изменить энергетическое состояние дефектов и, как следствие, вызвать изменение физико-химических параметров материала, в том числе повышение износостойкости конст-

рукционных легированных сталей после их обработки ориентировочно в 1,2...2 раза. Однако механизм влияния такой обработки на свойства и структуру исследованных материалов не ясен, хотя известно, что такое воздействие оказывает влияние на основное состояние атомов и на локальные характеристики кристаллической решетки. Изучение локальных характеристик прецизионных сплавов Fe₃(SiAl) после их магнитно-импульсной обработки и является предметом настоящего исследования.

Методика эксперимента

В настоящей работе методами растровой электронной и атомной силовой микроскопии, мессбауэровской спектроскопии и некоторыми другими методами экспериментально изучалось влияние слабых (10...100 кА/м) низкочастотных (10...20 Гц) импульсных магнитных полей на структуру и свойства поверхности и спиновое состояние атомов железа в объеме материала и, как следствие, на локальные характеристики кристаллической решетки сплавов $Fe_3(SiAl)$ — сендаст. Сравнительный анализ характеристик образцов проводился до и после магнитно-импульсного воздействия.

Магнитно-импульсная обработка проведена в установке с системой автоматического управления параметрами импульсов [5]. В процессе обработки регулировали амплитуду импульсов, их длительность, а также интервалы между импульсами.

Рентгеноспектральный микроанализ и анализ структуры поверхности в микрометровом диапазоне выполнен в растровом электронном микроскопе с энергодисперсионным рентгеноспектральным детектором INCAx-sight. Изучение структуры поверхности в субмикрометровом и нанометровом диапазонах проведено в атомном силовом микроскопе. Исследования локальных характеристик кристаллической решетки в нанометровом диапазоне выполнено методом мессбауэровской спектроскопии на ядерном гамма-резонансном (ЯГР)спектрометре MS-1104EM с автоматической обработкой ЯГР-спектров по программе UnivemMS; изомерный сдвиг спектров определяли относительно α-Fe. Определение удельной поверхности, суммарного объема, радиуса пор и распределения пор по размерам в нанометровом диапазоне выполняли на анализаторе сорбции газов "Nova 1200е". Измерения микротвердости выполнены стандартными методами.

Результаты исследований и их обсуждение

Некоторые из полученных результатов исследования приведены ниже. Изучение поверхности с использованием электронного и механического зондов в микрометровом диапазоне существенного влияния магнитно-импульсной обработки

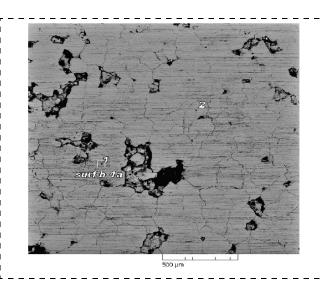


Рис. 1. Типичная структура поверхности сплава сендаст, полученная в растровом электронном микроскопе

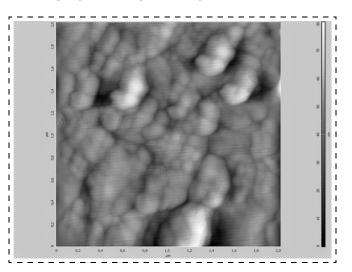


Рис. 2. Типичная структура поверхности сплава сендаст, полученная в атомном силовом микроскопе

на структуру и состав поверхности не выявили (рис. 1 и 2).

Изучение процессов трещинообразования в материале методом индентора показало, что для исходных образцов разрушение происходит при относительной нагрузке в 30...50 H, причем трещины распространяются как по границам зерен, так и по зерну. После обработки в магнитном поле число трещин около отпечатка уменьшается, и нагрузка их появления повышается до 150 H. Зависимость среднего числа трещин N у отпечатков при вдавливании пирамиды Виккерса (нагрузка 300 H) и числе импульсов 20 от напряженности магнитного поля показаны на рис. 3.

В то же время изучение изменения уровня дефектности в сплаве после магнитно-импульсной обработки, которое может быть связано с перераспределением внутренних напряжений вследствие упорядочения вакансий, изменением дислокационной структуры сплава, магнитострикционным

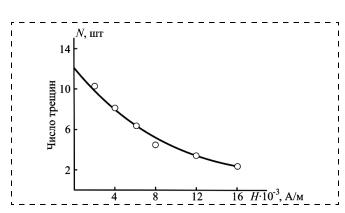


Рис. 3. Зависимость среднего числа трещин N у отпечатков при вдавливании пирамиды Виккерса (нагрузка 300 H) от напряженности внешнего магнитного поля H

упрочнением, позволило выявить изменения в пористости поверхности в нанометровом диапазоне. Для выяснения особенностей вакансионной структуры, образуемой в результате их коалесценции, был использован метод многоточечного анализа поверхности (метод Брюнера—Эммета—Теллера, так называемый метод BET) и метод расчета распределения пор по размерам на основании изотерм адсорбции или десорбции (метод Баррета—Джойнера—Халенды, так называемый метод BJH); некоторые из полученных результатов приведены в таблице.

Полученные результаты по магнитно-импульсной обработке показывают, что она влияет на удельную поверхность с учетом открытых пор, а также на суммарный объем пор и не влияет на средний радиус пор. Число импульсов при постоянстве других параметров магнитно-импульсной обработки приводит к уменьшению как удельной поверхности образцов, так и к суммарному объему пор. Можно предположить, что магнитно-импульсное воздействие перераспределяет и "залечивает" дефекты. Поскольку радиус пор не меняется, то можно говорить, что при магнитно-импульсной обработке происходит лишь перераспределение дефектов с увеличением упорядочения катионов в структуре, причем это в большей степени происходит на поверхности, поскольку в результате измерения анализируются лишь открытые поры.

Причиной снижения пористости образцов может быть локальное магнитострикционное сжатие кристаллической решетки сплава. Влияние магнитно-импульсной обработки на кристаллическую

Образец Fe ₃ (SiAl)	Число импуль- сов	Удельная поверх- ность, м ² /г	Суммарный объем пор, cm^3/Γ	Средний радиус пор, нм
Исходный Обработан- ный 1	_ 30	13,7 2,3	$1,2 \cdot 10^{-2} \\ 2,4 \cdot 10^{-3}$	1,63 1,62
Обработан- ный 2	50	1,8	$1.8 \cdot 10^{-3}$	1,63

решетку сплава сендаст проведено методами ЯГР-спектроскопии, основанной на использовании эффекта Мёссбауэра. ЯГР-спектрометрия показала, что в процессе магнитно-импульсной обработки происходит изменение ближайшего окружения атомов железа. На рис. 4 показаны спектры Fe₃(SiAl) исходного образца и его же после магнитно-импульсной обработки.

Спектры были разложены на составляющие секстеты с использованием указанной выше программы обработки ЯГР-спектров. Наилучшее согласие экспериментального и расчетного спектров оказалось при варианте представления спектра (как до, так и после электроимпульсной обработки) на 5 секстетов. Для лучшей сопоставимости образцов до и после электроимпульсной обработки при разложении спектров задавали равную ширину для

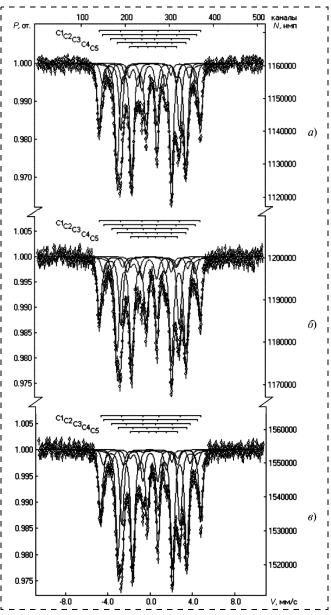


Рис. 4. Мессбауэровские спектры $Fe_3(SiAI)$ до (a) и после (δ, ϵ) магнитно-импульсной обработки; число импульсов 30 (δ) и 50 (ϵ)



всех секстетов. Анализировали следующие параметры компонентов спектров: изомерный химический сдвиг δ , квадрупольное расщепление Δ , напряженность магнитного поля H на ядрах $Fe^{3/}$, ширину резонансных линий и площади секстетов, пропорциональные неэквивалентным положениям ионов железа в структуре Fe₃(SiAl). Из результатов исследования следует, что в процессе магнитноимпульсной обработки происходит изменение ближайшего окружения атомов железа. В частности, увеличивается число атомов Fe, имеющих в ближайшем окружении 8 и 4 атома железа — секстеты C1, (β -vзлы) и секстеты C4, (γ -vзлы) соответственно; одновременно уменьшается число атомов железа, имеющих в первой координационной сфере 7 и 3 атомов железа. Это свидетельствует об увеличении заселенности этих положений атомами железа и, соответственно, уменьшением вакансии в узлах γ и β вследствие дополнительного упорядочения сплава. Обработка спектров не позволила обнаружить больших изменений параметров их сверхтонкой структуры — напряженности магнитного поля на ядрах ${\rm Fe}^{5+}$ (*H*) и изомерного сдвига (δ). Незначительные изменения этих параметров наблюдаются для секстиплета СЗ (окружение 6 Fe, 2 вакансии). Вместе с тем, для таких атомов железа заметно уменьшается значение квадрупольного расщепления: с 0,16 до 0,05 и с 0,03 до 0,05 мм/с соответственно.

Отметим, что изменение прочностных характеристик сплава коррелирует с уменьшением значения квадрупольного расщепления и связывается с напряжений перераспределением внутренних вследствие упорядочения атомов и дефектов кристаллической структуры материала. Причиной этих процессов может быть магнитострикция. Суть магнитострикционного упрочнения заключается в следующем: в исходном состоянии ферромагнитная матрица сплава разделена на множество доменов. При смещении междоменных границ под действием внешнего магнитного поля изменяются направления спиновых моментов электронов, что сопровождается магнитострикционной деформацией и, соответственно, возникновением добавочных упругих напряжений. Взаимодействие упругого поля, обусловленного магнитострикцией, с упругим полем дислокационной структуры приводит к появлению локальных перенапряжений межатомных связей, вследствие чего происходит перемещение дислокаций или их размножение. Чаще всего переползание дислокаций осуществляется по вакансионному механизму. В свою очередь, вакансии переходят в состояние, соответствующее их устойчивому состоянию. С увеличением плотности

дислокаций материал претерпевает своеобразный наклеп и упрочняется.

Заключение

Выполненные исследования показывают, что магнитно-импульсная обработка является эффективным способом воздействия на кристаллическую структуру упорядочивающихся прецизионных сплавов Fe₃(SiAl). В результате такого воздействия удается повысить твердость сплава в 1,5...1,8 раза, а его трещиностойкость — в 3 раза. Причиной этого упрочнения может являться воздействие импульсов магнитного поля на спиновую систему материала, вследствие чего возникают добавочные упругие напряжения, стимулирующие снижение концентрации вакансий, переползание дислокаций и дополнительное упорядочение сплава.

Авторы признательны профессору Б. А. Староверову за магнитно-импульсную обработку образцов сплава сендаст.

Данная работа была выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования МФТИ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (ГК № 16.552.11.7022), а также Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Калужской области (проект № 12-08-97595).

Список литературы

- 1. Шипко М. Н., Помельникова А. С., Шипко Г. А. Физико-химические особенности технологий поверхностного упрочнения сталей и сплавов. Иваново: Изд-во Ивановского государственного энергетического университета им. В. И. Ленина, 2008. 143 с.
- 2. **Шипко М. Н., Степович М. А., Староверов Б. А., Костюк В. Х.** Влияние слабых низкочастотных импульсных магнитных полей на физико-механические свойства металлов и прецизионных сплавов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2012. № 1. С. 2—6.
- 3. Вирюс А. А., Каминская Т. П., Коровушкин В. В., Дуров Н. М., Шипко М. Н., Степович М. А. О некоторых проблемах математического моделирования влиянии слабых импульсных электрических и магнитных полей на процессы упорядочения в прецизионных сплавах Fe—Si—Al // Научные труды Калужского государственного университета им. К. Э. Циолковского. Естественные науки. Калуга: Издво КГУ им. К. Э. Циолковского, 2012. С. 19—23.
- 4. Вирюс А. А., Каминская Т. П., Коровушкин В. В., Дуров Н. М., Шипко М. Н., Шипко Г. А., Степович М. А. О некоторых проблемах изучения влияния слабых импульсных электрических и магнитных нолей на процессы упорядочения в прецизионных сплавах Fe—Si—Al // Радиационная физика твердого тела: Труды XXI международного совещания (9—14 июля 2012 г., г. Севастополь / Под ред. Г. Г. Бондаренко. М.: ФГБНУ "НИИ перспективных материалов и технологий МИЭМ НИУ ВШЭ" 2012 С 96—100
- нологий МИЭМ НИУ ВШЭ", 2012. С. 96—100. 5. **Староверов Б. А., Степович М. А., Шипко М. Н.** Автоматизация процессов импульсной магнитной обработки металлов и прецизионных сплавов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011. № 8. С. 1—4.



УДК 621.318.12

Б. В. Хлопов, канд. техн. наук, доц., нач. отдела, ФГУП "ЦНИРТИ им. академика А. И. Берга", Москва, e-mail: hlopovu@yandex.ru,

М. И. Самойлович, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лаб.,

ОАО "Центральный научно-исследовательский технологический институт "Техномаш", Москва, **В. Бовтун**, Dr. Sc, вед. науч. сотр., Институт физики АН ЧР, Чешская республика, г. Прага

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА
МУЛЬТИПЛИКАЦИИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
В УСТРОЙСТВАХ БЕСКОНТАКТНОГО
СТИРАНИЯ ИНФОРМАЦИИ
С ЭЛЕКТРОННЫХ НОСИТЕЛЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НАНОКОМПОЗИТОВ
НА ОСНОВЕ ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ

Поступила в редакцию 05.04.2013

Исследованы свойства образцов метаматериалов на основе опаловых матриц для устройств бесконтактного стирания информации с электронных носителей. Разработан метод оценки восприимчивости к магнитным полям образцов композитных материалов при воздействии на них внешними электромагнитными полями. Приведены экспериментальные результаты эффекта мультипликации для электромагнитных полей в полеобразующей системе устройства стирания информации на частотах ниже 500 кГц. Экспериментально подтверждено, что в диапазоне частот до 500 кГц электромагнитная восприимчивость испытуемых образцов меняется, влияя на значение напряженности электромагнитного поля в полеобразующей системе устройства стирания информации. Приведены экспериментальные характеристики пространственного мультиплицирования электромагнитных полей на полупроводниковый носитель информации.

Ключевые слова: наночастицы, метаматериалы, нанокомпозитные материалы, мультипликация, электромагнитное поле, фазовая скорость, тонкопленочный слой, полеобразующая система, стирающее устройство

Введение

Метаматериалы как нанокомпозиты представляют собой наномасштабных размеров дискретную среду, периодическую по электромагнитным свойствам. К наиболее перспективным трехмерным материалам подобного типа можно отнести решетчатые упаковки микросфер кремнезема со структурой опала (опаловые матрицы), с заполнением их нанополостей металлами или магнитными кристаллитами [1]. В опаловых матрицах, в которых нанополости частично заполнены указанными ме-

таллами, имеет место большая микроволновая проводимость, так что при воздействии внешних магнитных полей наблюдается значительный электрический "отклик", в свою очередь приводящий к эффекту мультиплицирования дополнительных электромагнитных полей для приложенных магнитных полей с одновременной генерацией за счет переходных процессов. В настоящей работе рассмотрены физические свойства образцов опаловых матриц, чьи нанополости были частично заполнены кристаллитами металлов составов (Ni + Fe + Co); (Fe), (Co), (Co + Fe) и (Ni + Fe), в дальнейшем обозначаемые как образцы (Ni + Fe + Co); (Fe), (Co), (Co + Fe) и (Ni + Fe). Представлены материалы по разработке оборудования и стендов для исследования свойств таких сред и влияние на них непрерывного и импульсного электромагнитного поля. По результатам экспериментальных исследований на разработанном оборудовании определены конструктивные и технологические процессы для создания эффекта мультиплицирования электромагнитных полей в полеобразующей системе при бесконтактном экстренном уничтожении информации с электронных полупроводниковых носителей информации.

Нанокомпозитные образцы

Нанокомпозитные образцы на основе опаловой матрицы выполнены из материала, представляющего упорядоченную и объемную (3D периодически упорядоченную) частотно зависимую (для электрических, диэлектрических и магнитных свойств) среду с пространственной (в диапазоне 200...300 нм) модуляцией указанных характеристик при размере активных областей (кластеров) в диапазоне 15...30 нм [2]. Конструктивно образцы представляют собой решетчатую упаковку микросфер рентгеноаморфного кремнезема диаметрами 190...345 нм (рис. 1).

Образцы обладают [3] высокой термопрочностью до 1100 °С и повышенной прочностью, а также характеризуются монодисперсностью для диаметров микросфер не свыше 4 %, химически устойчивы. Опаловая матрица представляет собой

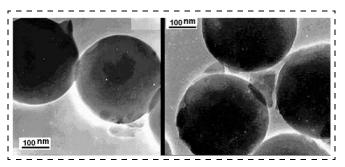


Рис. 1. Электронно-микроскопические снимки на просвет нанокомпозита: опаловая матрица, чьи межсферические нанополости заполнены кластерами кобальта

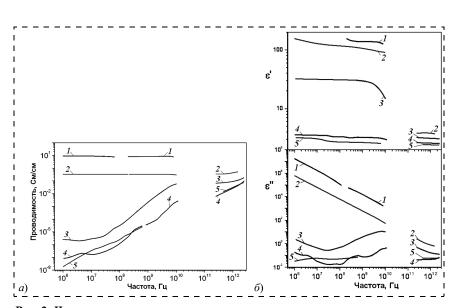


Рис. 2. Частотные зависимости: a — микроволновой проводимости; δ — диэлектрических характеристик нанокомпозитов — опаловая матрица (5) и опаловая матрица, межсферические нанополости которой частично заполнены: I — (Ni + Fe); 2 — (Fe); 3 — (Ni + Fe + Co); 4 — (Ni)

плотно упакованную периодическую структуру субмикрометровых микросфер SiO_2 без заполнения межсферических пустот. После введения необходимых металлов, например (Fe + Ni + Co), в виде рентгеноаморфных оксидов, которые сосредоточены в нанополостях между микросферами (до 25 % общего объема), проводится их кристаллизация в восстановительной среде. Подобные пространственно неоднородные метаматериалы с частотной модуляцией (дисперсией) электрических и диэлектрических параметров, обладающие большими значениями реальной компоненты диэлектрической проницаемости (ε') и малыми — для мнимой компоненты (ϵ''), создают различные эффекты, один из которых выражается в неравномерном распределении локальных токов, образующихся (при импульсном магнитном воздействии) по сечению образцов из указанных материалов. Частотные зависимости микроволновой проводимости и компонентов диэлектрической восприимчивости для композитов на основе опаловых матриц с расположенными в микрополостях кластерами из магнитных и немагнитных металлов приведены на рис. 2. Экспериментальные образцы имели габаритные размеры $19 \times 12 \times 3$ мм).

Исследование магнитных свойств образцов (мультипликаторов)

Для этих целей был разработан стенд, обеспечивающий проверку магнитной восприимчивости материалов при воздействии на них электромагнитным полем в диапазоне частот 340...500 кГц. Стенд состоит из полеобразующей системы, генератора тока, источника питания, системы охлаждения дросселя, изготовленного из медной трубки, по которой поступала охлаждающая жидкость, и

аттестованных и поверенных измерительных приборов (рис. 3). Метод исследования магнитных свойств [6] заключается в облучении указанных образцов электромагнитным полем на различных частотах от 340 до 500 кГц в рабочем диапазоне стенда и сравнении результатов с результатами, полученными от облучения образцов (SiO₂), (Cu) немагнитных материалов.

Один из образцов мультипликатора из метаматериала, например (Ni + Fe), размещают в полеобразующей системе в центральной части дросселя и последовательно облучают частотами в диапазоне $\omega = 340...500~\mathrm{k\Gamma L}$, при этом изменяют напряжение питания генератора тока и проводят измерения силы тока дросселя, напряжения питания генератора тока, амплитуды напряжения на емкостном накопителе, выполненном в виде

блока конденсаторов, и напряженности магнитного поля приборами, например, измерителем параметров электрического и магнитного полей ВЕ-МЕТР-АТ-002 (-003) и измерителем плотности потока электромагнитной энергии МЗ-90. Напряжение питания генератора тока изменяют в пределах от 20 до 80 В. На рис. 4 приведены кривые, отображающие изменение напряженности магнитного поля при мультипликации, на рис. 5 — при облучении образцов от частоты в центральной области дросселя, в месте поочередного размещения образцов мультипликаторов (Fe), (Ni + Fe + Co), керамического немагнитного материала (SiO₂) и немагнитного материала пластины из меди (Cu).

Анализ экспериментальных результатов, приведенных на рис. 4, показал, что при размещении указанных образцов в рабочей камере полеобразующей системы оборудования имеет место эффект мультипликации для определенной области, при этом увеличивается напряженность магнитного поля в диапазоне 170...275 кА/м. Пластины, изготовленные из немагнитного материала Си, с увеличением частоты в диапазоне частот 315...500 кГц обладают ярко выраженным экранирующим свойством и в указанном диапазоне значения напря-

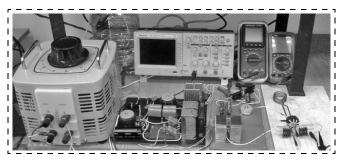


Рис. 3. Макет оборудования для испытаний образцов магнитных метаматериалов на основе опаловых матриц

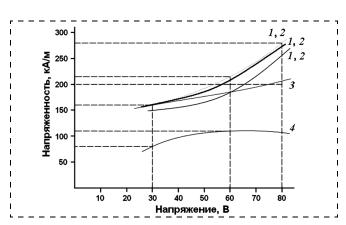


Рис. 4. Частотная зависимость напряженности магнитного поля для образцов (Ni + Fe + Co), (Fe) (кривые 1, 2) Cu; SiO $_2$ (кривые 3, 4)

женности электромагнитного поля уменьшаются с $125\ \text{до}\ 97\ \text{кA/m}.$

По существу, тензор $\varepsilon_{ij}(\omega)$ описывает как электрический, так и магнитный отклики среды для произвольных ω и вектора \mathbf{k} , который при учете пространственной дисперсии указывает определенное направление. В рассматриваемом случае для пространственной дисперсии появляется параметр, описывающий "магнитный отклик", связанный с магнитной восприимчивостью, а для магнитной проницаемости — "электрический отклик" среды, связанный с диэлектрической восприимчивостью. Соответственно, индукция электрического поля $D_i = \varepsilon_{ij}(\omega) E_j$ зависит не только от напряженности электрического поля E (локальный отклик), но и от локального электрического поля в некоторой окрестности [1, 7].

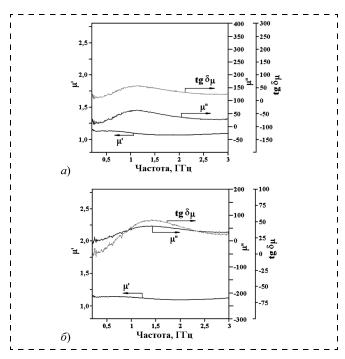


Рис. 5. Частотные зависимости действительной (μ') и мнимой (μ'') компонент магнитной проницаемости и тангенса потерь для образцов опаловых матриц, межсферические нанополости которой содержат кластеры (Ni + Fe) (a) и (Co + Fe) (δ)

В общем случае зависимость $B_i = \mu_{ij}(\omega)H_j$ между компонентами магнитной индукции (B_i) и приложенным магнитным полем (H_i) определяется тензором $\mu_{ii}(\omega)$, однако условием применимости такого классического приближения (среда непрерывна и сплошная) является то, что длина волны электромагнитного поля $\lambda \ge a$, где a — параметр атомарных размеров, например, постоянная решетки или длина свободного пробега электрона и другие, которые не выполняются для рассматриваемой системы. В обычных материалах $\varepsilon(\omega)$ и $\mu(\omega)$ слабо зависят от частоты, но когда любой из структурных параметров а становится сопоставим с длиной волны в среде, стандартное электродинамическое описание сплошных сред становится не применимым — необходимо учитывать зависящий от координат отклик материала. Как известно [8], при увеличении частоты, в отличие от $\varepsilon(\omega)$, магнитная проницаемость μ(ω) сравнительно рано теряет физический смысл, а именно, перестает быть физической величиной, определяющей магнитный момент единицы объема среды (см., в частности, частотные зависимости µ для образцов (Ni + Fe), (Co + Fe) на рис. 5, в которых сочетаются магнитные и немагнитные металлы).

Пространственное мультиплицирование магнитных полей на полупроводниковый носитель информации

Этот процесс обеспечивается разработанным методом для экстренного стирания записанной информации с микросхемы с неоднородным полупроводниковым носителем информации с энергонезависимой памятью [6]. Метод основан на процессе облучения микросхемы полем, представляющим сумму переменных электромагнитных полей. Первое поле, создаваемое дросселем, и второе поле образуются в результате мультипликации электромагнитных полей дросселя.

На рис. 6 приведены экспериментальные графики равномерного распределения напряженности электромагнитного поля в рабочем простран-

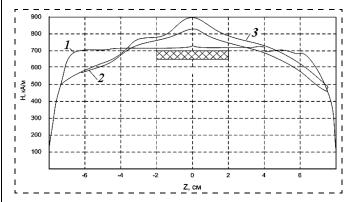


Рис. 6. Пространственное распределение значений компонентов $H_{\Sigma}(I),\ H_{\parallel}(2),\ H_{\perp}(3)$ магнитного поля для образцов (Ni + Fe + Co) (1) и (Fe) (2)

стве дросселя $H_{\Sigma} = 700$ кА/м и распределение напряженности электромагнитного поля с размещенным в рабочем пространстве образцом (Ni + Fe + Co), (Fe). Максимальная измеренная напряженность магнитного поля после мультипликации электромагнитного поля с направлением вектора индукции параллельно плоскости образца $H_{\parallel} = 825 \text{ кA/м}$ и измеренная напряженность магнитного поля с эффектом мультипликации с направлением вектора индукции нормально к плоскости образца $H_{\perp} = 900$ кА/м. Измерения пространственного распределения напряженности магнитных полей проведены на фиксированной частоте 480 кГц в полеобразующей системе опытного образца устройства стирания информации [9]. Свойства нанокомпозитных образцов (Ni + Fe) и (Fe) метаматериала на основе опаловой матрицы были реализованы при разработке конструктивных решений для бесконтактных устройств стирания информации с электронных носителей.

Иная ситуация с проводимостью (см. рис. 2) и частотными зависимостями действительной (µ') и мнимой (µ") компонент магнитной проницаемости и тангенса потерь для образцов опаловых матриц, межсферические нанополости которой содержат кластеры (Fe) и (Co) (рис. 7, 8). В обоих случаях при близости значений кривые указанных зависимостей заметно отличаются от приведенных на рис. 5.

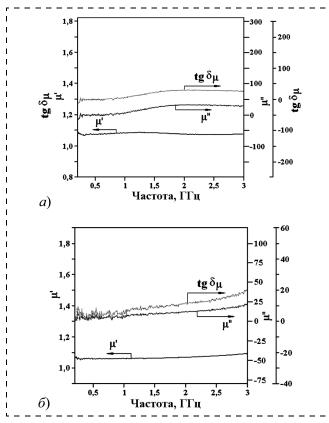


Рис. 7. Частотные зависимости действительной (μ') и мнимой (μ'') компонент магнитной проницаемости и тангенса потерь для образцов опаловых матриц, межсферические нанополости которых содержат кластеры (Co) (a) и (Fe) (δ)

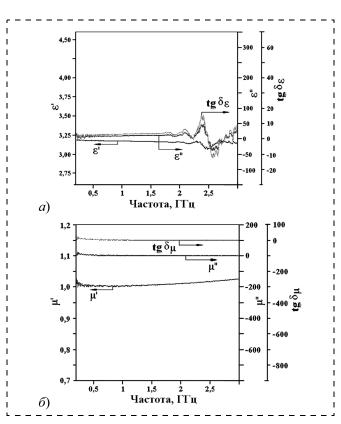


Рис. 8. Частотные зависимости действительной (μ') и мнимой (μ'') компонент магнитной проницаемости и тангенса потерь для образцов опаловых матриц, межсферические нанополости которой содержат кластеры (Ni+Fe)

Исследования магнитных свойств образцов (мультипликаторов) при воздействии внешним импульсным магнитным полем

Исследование магнитных свойств образцов (мультипликаторов) заключается в воздействии на образцы внешним импульсом магнитного поля напряженностью 700 кА/м, созданным электромагнитным полем полеобразующей системы с косоугольной намоткой [10]. Предельные значения длительности импульса магнитного поля от 1,0 до 4,2 мс установлены с учетом экранирующих свойств корпуса, устройств механической защиты носителей информации.

Разработанный стенд, обеспечивающий исследование свойств магнитной восприимчивости образцов метаматериалов (Ni + Fe), (Fe), (Co + Ni) и (FeTi $_2$ O $_5$) при воздействии импульсного магнитного поля, состоит из оригинальной многовекторной полеобразующей системы и генератора импульсов. Полеобразующая система с косоугольной намоткой создает равномерное пространственное распространение импульсного магнитного поля в закрытом объеме по осям X, Y, Z.

Такое конструктивно-технологическое решение обеспечивает при воздействии магнитным импульсом на образец метаматериала измерить пространственные импульсные значения напряженности по различным направлениям (X, Y, Z) при воздейст-

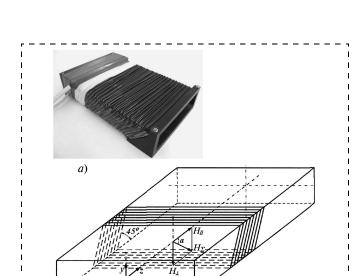


Рис. 9. Общий вид макета полеобразующей системы (a) и фрагмент полеобразующей системы с косоугольной намоткой на прямоугольный каркас (к которому относится обозначение осей $X,\ Y,\ Z)$ и значения магнитных полей (δ)

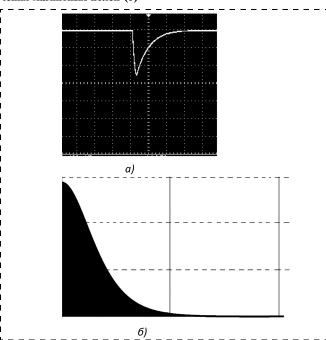


Рис. 10. Формы импульса продольной (a) составляющей магнитного поля и частотного спектра импульса (δ), образованного соленоилом с косоугольной намоткой

вии одним импульсом магнитного поля. На рис. 9 приведен общий вид макета полеобразующей системы с косоугольной намоткой. Генератор импульсов [11] выполнен на тиристоре.

Длительность $\tau_{0,5}$ импульса магнитного поля, создаваемого продольной составляющей (Z) полеобразующей системы, составляла $\tau_{0,5}=1,5$ мс (без учета ослабления за счет экранирования корпусом носителя информации). На рис. 10 представлена форма и частотный спектр импульса продольной составляющей (Z) магнитного поля, образованного соленоидом с косоугольной намоткой.

На рис. 11 представлена форма и первый лепесток частотного спектра импульса длительностью

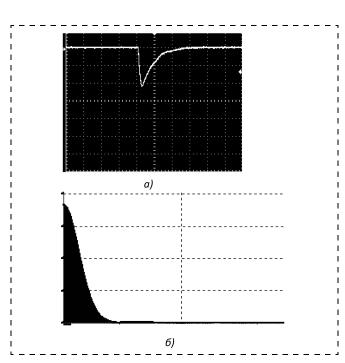


Рис. 11. Формы импульса поперечной (a) составляющей магнитного поля и первого лепестка частотного спектра импульса (δ), образованного соленоидом с косоугольной намоткой

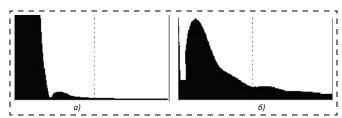


Рис. 12. Фрагменты формы спектра импульсного сигнала длительностью 4,2 мс

 $au_{0,5} = 4,2$ мс (без учета ослабления за счет экранирования корпусом носителя информации) поперечной составляющей (x) магнитного поля, образованного соленоидом с косоугольной намоткой. На рис. 12 представлены фрагменты составляющих частотного спектра воздействующего импульса длительностью 4,2 м.

Результаты экспериментальных исследований

Исследованы свойства образцов (Ni + Fe), (Fe), (Co + N) и (FeTi $_2$ O $_5$) на основе метаматериалов, представленных в виде опаловых матриц опала (решетчатая упаковка наносфер SiO $_2$ с заполнением межсферических пустот). Приведены экспериментальные результаты мультипликации импульсных магнитных полей образцами, изготовленными из метаматериалов в однородном электромагнитном поле, в полеобразующей системе устройства стирания информации. В рабочей камере полеобразующей системы с косоугольной намоткой для исследования эффектов пространственного перераспределения магнитного поля и мультиплицирования образцами метаматериалов создавалось импульсное магнитное поле с однородном распределением его напря-

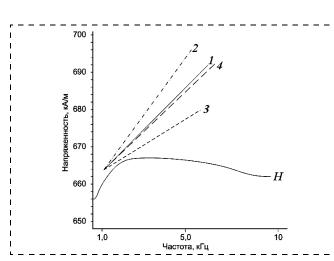


Рис. 13. Зависимости продольной (по оси Z) составляющей напряженности магнитного поля от изменения значений частоты импульса для образцов:

 $1-({
m Ni}+{
m Fe}),\,2-({
m Fe});\,3-({
m Co}+{
m Ni});\,4-({
m FeTi}_2{
m O}_5),\,H-{
m B}$ отсутствии образца в полеобразующей системе

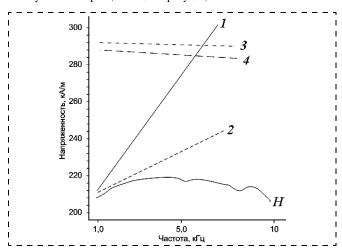


Рис. 14. Зависимость напряженности поперечной (по оси X) компоненты магнитного поля от частоты импульса для образцов: $I-(\mathrm{Ni}+\mathrm{Fe});\ 2-(\mathrm{Fe});\ 3-(\mathrm{Co}+\mathrm{N})\mathrm{i};\ 4-(\mathrm{FeTi}_2\mathrm{O}_5),\ H-$ без образца в полеобразующей системе

женности. При воздействии импульсного электромагнитного поля образуется поле с продольными и поперечными составляющими напряженности (полеобразующая система с компонентами напряженности магнитного поля, направленным нормально и параллельно плоскости образца пластины метаматериала [5]). Основным элементом полеобразующей системы является прямоугольный каркас ("пенал"), выполненный из материала ПК-4. В данный прямоугольный элемент помещаются образцы (Ni + Fe), (Fe), (Co + N) и $(FeTi_2O_5)$ нанокомпозитов. В каркасе полеобразующей системы установлен вкладыш для размещения образцов пластин метаматериалов с габаритными размерами (мм): (Ni + Fe) $(19 \times 11.5 \times 2.1)$; (Fe) $(19.1 \times 11.5 \times 1.9)$; (Co + Ni) $(19.5 \times 11.0 \times 3.0)$; (FeTi₂O₅) $(19.0 \times 11.4 \times 3.0)$, который имеет упор, ограничивающий движение образцов. Образцы пластин метаматериалов размещаются по центру полеобразующей системы прямоугольного каркаса ("пенала"). Исследовалось

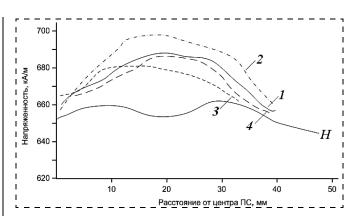


Рис. 15. Зависимости продольной (по оси Z) составляющей напряженности магнитного поля при частоте импульса 3,8 кГц для образцов: $1-(\mathrm{Ni}+\mathrm{Fe});\ 2-(\mathrm{Fe});\ 3-(\mathrm{Co}+\mathrm{N});\ 4-(\mathrm{Fe}\mathrm{Ti}_2\mathrm{O}_5);\ H-$ без образца в полеобразующей системе (ПС); точка 20 мм соответствует центру пластины образца

также пространственное распределение значения напряженности электромагнитного поля в полеобразующей системе с косоугольной намоткой. На рис. 13 приведены пространственное распределение продольной составляющей напряженности магнитного поля внутри рабочей камеры [5] полеобразующей системы, при этом для поперечной составляющей неоднородность распределения напряженности магнитного поля не превышает 120 кА/м.

На размещенные образцы воздействуют импульсным магнитным полем с длительностью импульсов в диапазоне 1,0...4,2 мс, что позволяет охарактеризовать диапазон частот, воздействующих на образцы метаматериала. Значение напряженности электромагнитного поля установлено в соответствии с требованиями для устройств стирания информации с магнитных носителей и с учетом магнитной восприимчивости образцов метаматериалов.

Приведенные на рис. 13—15 данные позволяют приблизительно оценить вклады от эффектов мультипликации (которые незначительны при малых частотах, но имеют тенденцию возрастать с переходом в область частот свыше 350 кГц с ростом микроволновой проводимости образцов) и фокусировки магнитного поля.

Конструкторские решения

Конструкторские решения, используемые в устройствах [12] стирания записанной информации с неоднородных полупроводниковых носителей информации с энергонезависимой памятью, флэшпамяти, реализуют контактные методы. Они заключаются в подаче на микросхему и на управляющий затвор транзистора номинального напряжения на время, не менее 1,5 мс. Возбуждение в проводниках микросхемы, размещенных на ее подложке, токов Фуко интенсивностью не менее 60 мА и облучение двумя электромагнитными полями под различными углами к плоскости подложки [12] происходят во время включения номинального напряжения питания микросхемы. При облучении электромагнитт

НЫМ ПОЛЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ЧЕРЕЗ СОЕДИНИТЕЛЬ USB в полеобразующей системе и элементах, введенных в рабочее пространство дросселя, ухудшает добротность и взаимоиндукцию и вызывает увеличение значений затухания электромагнитного поля в контуре полеобразующей системы, что приводит к изменению резонансных характеристик в резонансном контуре системы, в связи с чем возрастают потери, уменьшается значение напряженности электромагнитного поля, воздействующего на микросхему, уменьшается энергия, выделяющаяся на подложке микросхемы.

Рассматриваемое решение, которое исключает электрическое соединение с микросхемой флэшпамяти через соединитель USB и одновременно обеспечивает надежное уничтожение записанной информации, реализуется бесконтактным методом. При одновременном воздействии и мультипликации двумя различными электромагнитными полями в частотном спектре электромагнитного поля, воздействующего на микросхему флэш-памяти, присутствуют как значения излучаемых частот электромагнитных полей дросселя, так и значения частотно-фазовой мультипликации дисперсии этих частот, представляющих сумму переменных электромагнитных полей. В результате мультипликации силовые линии электромагнитного поля изменяют свое направление, фокусируясь в области размещения композитного материала — мультипликатора, и значение напряженности электромагнитного поля дросселя увеличивается. Технический результат при бесконтактном методе достигается благодаря тому, что устройство стирания записанной информации содержит (рис. 16): корпус 1 полеобразующей системы с крышкой 2, в котором размещен каркас 3 с крышкой 4, на котором закреплены функциональные узлы полеобразующей системы — дроссель 5 и мультипликатор 6 электромагнитных полей, микросхема 7, поглощающий материал 8.

Корпус полеобразующей системы выполнен из немагнитного металла в форме пустотелого параллелепипеда, внутри которого размещен каркас квадратного поперечного сечения, выполненный из неметаллического (керамического) и немагнитного материала. На боковые стенки каркаса намо-

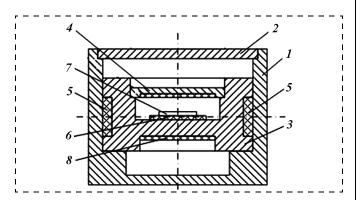


Рис. 16. Полеобразующая система, реализующая бесконтактный метод экстренного стирания информации с полупроводниковых носителей

тана обмотка дросселя, в центральном поперечном сечении дросселя установлен мультипликатор электромагнитных полей, а на нем размещена микросхема флэш-памяти. Разработанный прибор бесконтактного стирания записанной информации с микросхемы с неоднородным полупроводниковым носителем информации с энергонезависимой памятью основан на облучении микросхемы одновременно полями мультипликатора, сформированными из переменных электромагнитных цолей дросселя (время воздействия таких полей не более 0,5 мс) и облучении электромагнитным полем, которое в результате эффекта мультипликации в объемном (3D-периодически упорядоченном) образце, воздействующим на запись, представлено суммой двух электромагнитных полей, а именно, переменного электромагнитного поля с частотой 480 ± 5 к Γ ц и поля, связанного с переходными процессами в метаматериале, определяемыми в основном микроволновой проводимостью и геометрическими факторами [12, 13]. При одновременном воздействии указанными двумя различными электромагнитными полями в частотном спектре электромагнитного поля, облучающего микросхему, присутствуют как значения несущих частот, так и значения, представляющие сумму переменных электромагнитных полей. Реализация конструкторского решения позволила изготовить макетный образец прибора, обеспечивающего требования по стиранию информации с электронных носителей.

Заключение

Метаматериалы определяются как композиты, состоящие из элементов различной формы (наноблоков), чьи геометрические размеры (десятки и сотни нанометров) значительно превосходят атомарные. Последнее означает, что для $\mu(\omega)$ невозможно пренебречь вкладом от диэлектрической проницаемости (зависящей от времени), поскольку магнитный момент единицы объема определяется токами электрической поляризации. В опаловых матрицах, в которых нанополости частично заполнены указанными металлами, имеет место большая микроволновая проводимость, так что при воздействии внешних магнитных полей наблюдается значительный электрический "отклик", в свою очередь приводящий к эффекту мультиплицирования для приложенных магнитных полей с одновременной генерацией за счет переходных процессов, дополнительных электромагнитных полей.

При воздействии продольной (по оси Z) составляющей электромагнитного поля, образующегося при воздействии импульсом в диапазоне частот от 3,0 до 10 кГц с напряженностью до 900 кА/м на образцы метаматериала, размещенные в рабочей камере полеобразующей системы стирающего устройства, наблюдается, наряду с эффектом концентрации (фокусировки) магнитного поля в определенном месте полеобразующей системы (что обусловлено измене-

нием граничных условий при внесении в нее указанных метаматериалов) эффект мультипликации в виде увеличения напряженности поля в пространственном объеме рабочей камеры, который незначителен при малых частотах, но имеет тенденцию возрастать с переходом в область частот свыше 350 кГц с ростом микроволновой проводимости образцов. Разработанные методики испытаний будут использованы при испытаниях изготавливаемых устройств стирания информации с электронных носителей.

Список литературы

- 1. **Sarychev A. K., Shalaev V. M.** Electrodynamics of metamaterials. NY: World Scientific and Imperial College Press, 2007. 200 p.
- 2. Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М., Цветков М. Ю. Особенности фазовых превращений и кристаллизации в нанополостях решетчатых упаковок наносфер SiO_2 // Наука и технологии в промышленности. 2010. № 4. С. 73—84.
- 3. Ustinov V. V., Rinkevich A. B., Perov D. V., Samoylovich M. I., Klescheva S. M. Anomalous magnetic antiresonance and resonance in ferrite nanoparticles embedded in opal matrix // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2012. V. 324. P. 78—82.

- 4. Самойлович М. И., Бовтун В., Ринкевич А. Б., Белянин А. Ф., Клещева С. М., Кемпа М., Нужный Д. Пространственно-неоднородные материалы на основе решетчатых упаковок наносфер SiO₂ // Инженерная физика. 2010. № 6. С. 29—38.
- на-по-подпоралыя магериалы на сенове решегнатых унаковож наносфер SiO₂ // Инженерная физика. 2010. № 6. С. 29—38. 5. **Наноматериалы.** III. Фотонные кристаллы и нанокомпозиты на основе опаловых матриц / Ред. М. И. Самойлович. М.: Техномаш. 2007. 303 с. 6. **Хлопов Б. В., Самойлович М. И., Митягин А. Ю.**
- 6. **Хлопов Б. В., Самойлович М. И., Митягин А. Ю.** Исследование пространственного мультиплицирования импульсного магнитного поля образцами метаматериалов // Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 1. С. 48—51.
- 7. **Агранович В. М., Горштейн Ю. Н.** Пространственная дисперсия и отрицательное преломление волн // УФН. 2006. Т. 176. № 10. С. 1051—1068.
- 2006. Т. 176. № 10. С. 1051—1068. 8. **Ландау Л. Д., Лившиц Е. М.** Теоретическая физика. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 281 с. 9. **Хлопов Б. В., Самойлович М. И., Митягин А. Ю.**
- 9. **Хлопов Б. В., Самойлович М. И., Митягин А. Ю.** Исследование пространственного мультиплицирования импульсного магнитного поля образцами метаматериалов // Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 1. С. 48—51.
- Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 1. С. 48—51. 10. **Хлопов Б. В., Лобанов Б. С., Пикуль А. И.** Методы повышения эффективности защиты информации, хранящейся на жестких магнитных дисках // Телекоммуникации и транспорт. 2009. № 4. С. 8—13.
- транспорт. 2009. № 4. С. 8—13.
 11. **Патент** RU № 2321165 от 7.03.2008 г. (приоритет от 04.08.2006 г.) Бюл № 9
- 04.08.2006 г). Бюл. № 9. 12. **Патент** RU № 2323491 от 27.04.2008 г. (приоритет от 16.05.2006 г.) Бюл. № 12
- 16.05.2006 г.). Бюл. № 12. 13. **Kong J. A.** Electromagnetic wave interaction with stratified negative isotropic media // Progress In Electromagnetics Research, PIER. 2002. V. 35. P. 1—52.

Материаловедческие и технологические основы МНСТ

УДК 6217315

- В. В. Амеличев, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
- **Е. В. Благов**, д-р физ.-мат. наук, первый зам. директора по науч. работе,
- Р. О. Гаврилов, мл. науч. сотр.
- e-mail: inmeras@yandex.ru,
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (ИНМЭ РАН)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ МАГНИТОРЕЗИСТИВНОЙ МЭМС КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

Поступила в редакцию 22.11.2013

Представлены результаты экспериментальных работ по созданию совмещенной технологии изготовления магниторезистивной МЭМС контроля параметров движения. Приведены результаты исследования совместимости технологических процессов объемной обработки кремния и формирования тонкопленочных магниторезистивных структур на одном кристалле. Рассмотрены возможности передачи по радиоканалу информационного сигнала магниторезистивной МЭМС контроля параметров движения.

Ключевые слова: беспроводной способ, балка, интегральная технология, консоль, кристалл кремния, магниторезистивная МЭМС, микромеханическая структура, магнитное поле, микромагнит, пермаллой, радиоканал, тонкая пленка, ускорение

Современные МЭМС представляют собой устройства, в которых на одном кристалле совмещаются микромеханические, полупроводниковые и тонкопленочные элементы. Интеграция различных микроэлементов в одном кристалле позволяет расширить функциональные возможности МЭМС при минимальных массогабаритных параметрах [1-3]. Совмещая на одном кристалле методами интегральной технологии микромеханические элементы (мембраны, балки или консоли) и тонкопленочные магниторезистивные элементы, можно получать МЭМС, обладающие дополнительной функцией — регистрировать изменение внешнего слабого магнитного поля. У такой комбинации микроэлементов есть свои достоинства и недостатки, отражающиеся как в простоте конструкций инерциальных и магниторезистивных структур, так в и сложности совмещения технологий их изготовления на одном кристалле. Среди достоинств, прежде всего, следует отметить сочетание свойств кремния, как основного конструкционного материала, позволяющих создавать упругие микроэлементы, и широкого динамического диапазона магниторезистивных преобразо мых д. объект

образователей магнитного поля, часто применяемых для бесконтактного контроля перемещений объектов на малые расстояния. При этом обязательно надо иметь в виду, что контролируемый объект перемещения должен обладать достаточным магнитным моментом или являться ферромагнетиком, способным оказывать влияние на магнитное поле в области чувствительного элемента магниторезистивного преобразователя. К недостаткам такой интеграции микроэлементов в магниторезистивной МЭМС следует отнести более сложную технологию, в рамках которой должны совмещаться процессы формирования объемных микроэлементов и тонкопленочных магниторезистивных наноструктур.

С учетом современных тенденций развития микросистем беспроводной способ передачи информационных сигналов в настоящее время становится все более популярным. Известно немало примеров, подтверждающих возможности интеграции полупроводниковых и микромеханических элементов на одном кристалле, кроме того, радиочастотные полупроводниковые микросхемы, в настоящее время получившие большую популярность в мобильной технике, могут также интегрироваться с микромеханическими и магниторезистивными элементами на одном кристалле. Одним из ключевых вопросов такой сложной технологии является совмещение техпроцессов формирования микромеханических и тонкопленочных структур на одном кристалле, при этом полупроводниковые элементы схем усиления, преобразования и передачи информационного сигнала могут быть заранее сформированы в определенной области кристалла [4].

В микросистемной технике часто прибегают к последовательным и параллельным принципам формирования функциональных элементов на одном кристалле. При этом в основном используются все технологические процессы интегральной микроэлектроники (термическое окисление, осаждение пленок, фотолитография, травление, диффузия, напыление металлов и др.). Исключение составляют, как правило, технологические операции с аномальными параметрами (глубокое анизотропное травление, удаление жертвенных слоев, напыление сверхтонких многослойных структур). Именно такие операции позволяют придать изделию уникальные специфические характеристики. В последнее время хороших показателей удается добиваться благодаря интеграции полупроводниковых электронных схем и микромеханических структур (миниатюрные датчики и преобразователи давления, ускорения, угла наклона, поворота, положения и т. д.). В структуре схем таких изделий все чаще встречаются элементы памяти, усилители, аналого-цифровые преобразователи, процессоры и другие электронные схемы. При этом обеспечивается совмещение технологий формирования полупроводниковых и микромеханических элементов на одном кристалле.

Последовательный принцип формирования функциональных элементов на одном кристалле основан на образовании микрорельефа за счет совокупности технологических операций формирования микроэлементов сначала с мелким профилем, а затем — с более высоким профилем. Данный принцип также предполагает последовательное снижение температуры формирования микроэлементов (сначала формируются микроструктуры под воздействием более высоких температур, а затем — при более низких).

Параллельный принцип формирования функциональных элементов на одном кристалле основан на совокупности технологических операций, при выполнении которых происходит одновременное создание электронных и микромеханических структур в едином технологическом цикле.

Беспроводные технологии передачи информационных сигналов в настоящее время становятся все более актуальными в различных системах мониторинга и транспорта. Системы управления и контроля транспортными средствами совершенствуются за счет применения в их составе новых более мощных вычислительных комплексов, а также высокочувствительных датчиков и преобразователей физических величин. Востребованными в таких системах также являются и новые электронные компоненты, обладающие комплексом функций, для измерения параметров физических величин, обработки и передачи информационного сигнала.

Косвенное применение магниточувствительных элементов позволяет через преобразование изменения магнитного поля объекта определить его параметры движения. Аналогичным образом работают хорошо известные датчики положения на основе преобразователей магнитного поля в электронных системах автомобилей и бытовой техники [5].

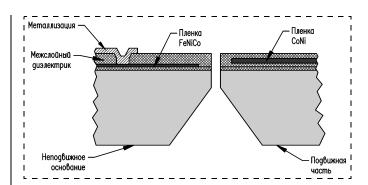
В состав конструкции преобразователя (датчика) положения входит миниатюрный магнит, создающий в области чувствительного элемента магнитное поле определенной величины и направленности. Выходная характеристика преобразователя магнитного поля зависит от линейного положения и угла поворота относительно постоянного магнита [6]. Конструкции датчиков положения имеют малые габаритные размеры и низкую себестоимость, что характерно для современных хорошо отработанных технологий высокого уровня дискретных приборов. Развитие достигнутых успехов косвенного применения магниточувствительных элементов возможно в совмещении в единой конструкции микромеханических и магниточувствительных элементов для создания микросистем контроля параметров движения. Кроме того, современные технологические методы микроэлектроники позволяют интегрировать в конструкцию микросистемы элементы радиоканала для передачи информационного сигнала. Особенностью совмещения различных методов формирования функциональных элементов в единой конструкции микросистемы является выработка определенных технологических требований, направленных на реализацию многофункциональной микросистемы.

В качестве исходного материала для изготовления тонкопленочных анизотропных магниторезистивных преобразователей применяются кремниевые пластины КЭФ4.5(100) толщиной 430...480 мкм и диаметром 100 мм. На данных пластинах формируется комбинированный изолирующий слой, состоящий из оксида кремния толщиной до 0,7 мкм, полученного с использованием процесса термического окисления кремния, и слоя Si_3N_4 толщиной 0,2 мкм, полученного с использованием процесса осаждения из газовой фазы при пониженном давлении. После этого с использованием процесса электронно-лучевого напыления пленок из сплава FeNiCo в вакууме создается многослойная пленка магниторезистивного преобразователя. Напыление осуществляется в постоянном магнитном поле для создания анизотропной магниторезистивной наноструктуры, обладающей осью легкого намагничивания. Магниторезистивные полоски необходимой конфигурации формируются путем травления магниторезистивного слоя через фоторезистивную маску. Завершающим микроциклом технологии изготовления магниторезистивного преобразователя (МРП) является химическая очистка поверхности пластин и осаждение изолирующего диэлектрического слоя SiO₂ толщиной до 0,5 мкм.

Затем на пластину наносится слой CoNi толщиной до 200 нм с подслоем Ті и проводится фотолитография для жидкостного химического травления фигуры микромагнита. Далее осаждается слой SiO₂ толщиной 0,5 мкм и выполняется фотолитография для формирования контактных окон. Плазмохимическим травлением вскрываются не только окна в оксиде кремния к магниторезисторам, но и области, ограничивающие консольные элементы, на которых сформированы микромагниты.

Следующим этапом формирования МРП является создание металлизированных контактов. Для этого перед напылением Al проводится ионная зачистка поверхности магниторезистивного слоя в контактных окнах, напыление первого уровня металла и его травление для создания межсоединений магниторезисторов в мостовую схему. Далее осаждается слой диэлектрика SiO₂ толщиной 1,0 мкм и проводится фотолитография для формирования переходных окон к первому слою металлизации. При этом плазмохимическим травлением вскрываются не только окна в оксиде кремния к металлизированным шинам первого уровня металла, но и области, ограничивающие консольные элементы, на которых сформированы микромагниты.

На следующем этапе формируется металлизация второго уровня из пленки алюминия толщиной 1,2 мкм для создания межэлементных соединений МРП и полупроводниковых схем, которые могут быть сформированы на одном кристалле [4—5]. Далее процесс защиты металлических проводников второго уровня с помощью осажденного слоя диэлектрика и вскрытия контактных площадок повто-



ряется с той особенностью, что и после первого уровня — открываются области, ограничивающие консольные элементы, на которых сформированы микромагниты.

На заключительном этапе, после того как сформированы все металлизированные проводники, обеспечивающие межэлементные соединения в МЭМС параметров движения, осуществляется глубокое анизотропное травление кремния в областях, ограничивающих консольные элементы, на которых закреплена кремниевая инерционная масса, содержащая тонкопленочный микромагнит. Наименьшая ширина области травления находится между неподвижной и подвижной частями МЭМС параметров движения, напротив магниторезистивных элементов и составляет 2...3 мкм (см. рисунок). Для того чтобы протравить эти области насквозь, необходим процесс анизотропного плазмохимического травления кремния с аспектным отношением не менее 100 и селективностью к диэлектрическим слоям не менее чем 1:500. Такой процесс может быть реализован с помощью установки глубокого прецизионного травления кремния AMS200 фирмы Alcatel (так называемый Boshпроцесс в газах SF_6 и C_4F_8).

Представленные результаты получены при выполнении работы в рамках федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы", Государственного контракта № 16.513.11.3057 от 19 апреля 2011 г.

Список литературы

- 1. **Sprotte A., Buckhorst R., Brockherde W., Hosticka B. J., Bosch D.** CMOS Magnetic-Field Sensor System. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1994. Vol. 29, N 8. P. 1002—1005.
- 2. **Казакевич А.** Акселерометры Analog Devices устройство и применение // Компоненты и технологии. 2007. № 5. С. 46—50.
- 3. Располов В. Я. Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. С. 27—35.
- 4. **Амеличев В. В., Галушков А. И., Дягилев В. В.** и др. Микроэлектронная магниторезистивная технология // Нано-и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 22—26.
- 5. Амеличев В. В., Сауров А. Н., Аравин В. В., Резнев А. А., Демин А. А., Хохлов М. В. Беспроводная магниторезистивная микросистема измерения магнитного поля // Изв. вузов. Электроника. 2012. № 6. С. 57—63.



лементы МНСТ

УДК 621.73.047.001

Е. А. Белогуров 1 , инженер,

e-mail: e.belogurov@gmail.com, Г. Г. Горох², канд. техн. наук, зав. лаб., И. А. Таратын^{1, 3}, канд. техн. наук, зав. отдел., В. В. Хатько¹, д-р физ.-мат. наук, проф.,

Белорусский национальный технический

университет Белорусский государственный университет

информатики и радиоэлектроники ОАО Минский научно-исследовательский институт радиоматериалов

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ КОЛЬЦЕВОГО ГИРОСКОПА НА ОСНОВЕ НАНОПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Поступила в редакцию 13.11.2012

Разработана технология изготовления чувствительного элемента кольцевого гироскопа из нанопористого анодного оксида алюминия. Проведено моделирование основных характеристик кольцевого гироскопа с таким чувствительным элементом. Резонансные частоты для чувствительного элемента представлены в виде функций от пористости и толщины спиц чувствительного элемента. Показано, что полученные выходные характеристики в некоторых случаях превосходят указанные параметры гироскопа с кремниевым чувствительным элементом.

Ключевые слова: нанопористый анодный оксид алюминия, моделирование микромеханического гироскопа, метод конечных элементов

Введение

Использование наноструктурированных материалов является одним из важнейших направлений развития МЭМС/НЭМС. В этой связи большой интерес представляют нанопористые материалы, в частности анодный оксид алюминия (АОА), представляющий собой периодическую матрицу параллельных ячеек гексагональной симметрии с центральной цилиндрической порой, возникающей при анодировании алюминия в процессе самоорганизации [1]. Важно отметить, что размеры самой ячейки и диаметр поры могут варьироваться в достаточно широком интервале. Нанопористая структура оксида улучшает целый ряд механических свойств: упругость, твердость, износостойкость и др. Это делает возможным применять пленки из АОА в качестве подложки для чувствительных элементов различных сенсоров, в том числе для гироскопических. При проектировании данных устройств на основе пористого анодного оксида алюминия важное значение имеет получение достоверных зависимостей их термомеханических параметров от пористости, что было осуществлено в работах [2, 3] методами конечно-элементного моделирования для компонентов тензоров упругости и теплопроводности. Ниже данные результаты будут использованы при моделировании характеристик кольцевого гироскопа с чувствительным элементом на основе нанопористого анодного оксида алюминия.

Методика изготовления подложек

В качестве исходного материала для изготовления нанопористых подложек использовали заготовки из алюминиевой фольги (99,99 %) размером 60×48 мм и толщиной 150 мкм. Перед анодированием проводили химическую и механическую обработку заготовок. Сначала удаляли органические загрязнения в бензине "Калоша" и сглаживали микронеровности на поверхности заготовок в 10 %-ном растворе NaOH в течение 15-20 с. После чего осуществляли уплотнение фольги и механическое полирование поверхности путем многократной прокатки алюминиевых заготовок через полированные валики, пропитанные прокаточной смесью (3 части веретенного масла + 1 часть авиационного керосина). Для снятия механических напряжений и придания плоскостности заготовкам проводили их терморихтовку под давлением около 10^{7} Па при 320 °C в течение 1 ч. После механической обработки толщина алюминиевых заготовок составляла около 120 мкм.

Полированные алюминиевые заготовки подвергали операции двухстороннего электрохимического анодирования в 0,6-мольном водном электролите щавелевой кислоты при постоянном напряжении 40 В с предварительной разверткой 10 В/с в течение 40 мин. Температуру электролита в течение всего процесса поддерживали на уровне 12—14 °C. Скорость анодирования в этих условиях составляла 0,25 мкм/мин. Сформированный на поверхности фольги "жертвенный" слой АОА селективно удаляли в растворе на основе ортофосфорной кислоты и хромового ангидрида (20 г/л ${\rm CrO_3},\ 35\ {\rm мл/л}\ {\rm H_3PO_4})$ при температуре 70 °C в течение 20 мин [4]. В результате этой операции на поверхности алюминия сохранялся упорядоченный микрорельеф отпечатков оксидных ячеек АОА. Толщина алюминия после удаления оксида составляла 100 мкм. Далее одну из сторон полученных заготовок закрывали слоем химически стойкого лака толщиной около 15 мкм, который сушили при комнатной температуре в течение 30 мин и затем в термокамере при температуре 90 °C в течение 10 мин. Повторное одностороннее анодирование алюминиевой заготовки со структурированной отпечатками оксидных ячеек поверхностью проводили в тех же электрохимических условиях, что и первое анодирование. Время одностороннего анодирования составляло 300 мин. За это время на непокрытой лаком стороне сформировался слой АОА толщиной 100 ± 1 мкм.

На заключительной стадии анодирования проводили плавное снижение напряжения со скоростью 0,05 В/с до нуля. За время снижения напряжения происходило утонение барьерного оксидного слоя, а рост анодного оксида практически прекращался. Для отделения АОА от алюминия и утонения стенок пор в области барьерного оксидного слоя дополнительно проводили катодную поляризацию образца с разверткой отрицательного напряжения со скоростью 0.05 B/c до -12 B. При этом напряжении выдерживали образец в течение 15 мин, после чего опять разворачивали напряжение до 45 В с разверткой 2 В/с и проводили реанодирование оставшегося алюминия через маску находящегося на нем АОА в течение 3—4 мин. В результате проведенных операций анодный оксид со сквозными порами практически отделялся от оставшегося алюминия, контакт сохранялся только по периферии подложки в зоне, покрытой лаком. В процессе анодирования осуществляли непрерывное перемешивание электролита, обеспечивающее равномерное распределение температуры и концентрации анионов в объеме электролита. Регистрацию и мониторинг in situ электрических параметров процесса, задаваемых стабилизированным источником питания и контролируемых высокоточными вольтметрами, проводили с помощью интерфейсной шины общего назначения (general-purpose interface bus (GPIB)) IEEE 488), соединенной с персональным компьютером с установленным программным обеспечением HP Vee 6.01.

На заключительном этапе с обратной стороны частично проанодированной алюминиевой подложки удаляли слой ХСЛ и избирательно стравливали оставшийся слой алюминия в селективном растворе (1,25 г/л $CuCl_2$, 840 мл/л HCl, 158 мл H_2O). Процесс проводили при температуре раствора около 18—22 °С. Длительность процесса до полного удаления алюминия с AOA составляла около 7 мин. Для удаления частиц меди, выпавших на по-

верхности АОА в процессе растворения алюминия, проводили химическую очистку оксида в концентрированной азотной кислоте (90 % HNO₃) при температуре 18—20 °С в течение 1 мин. Для полного удаления остатков барьерного оксидного слоя, частичного удаления из пор загрязненного анионами электролита оксида, а также для увеличения пористости АОА полученные образцы нанопористых подложек погружали

в 2-мольный раствор серной кислоты ($\rm H_2SO_4$), нагретый до температуры 50 °C, и выдерживали в течение 10-20 мин, в результате чего средний диаметр пор увеличивался до 40 нм. Полученные свободные нанопористые подложки AOA толщиной около 100 мкм тщательно промывали в проточной дистиллированной воде, сушили в шкафу при температуре 160 °C в течение 30 мин.

Методом сканирующей электронной микроскопии с высоким разрешением изучали морфологию поверхности нанопористых подложек из AOA с помощью сканирующих электронных микроскопов (СЭМ) Supra 55 WDS (при ускоряющем напряжении 3 кВ) и Hitachi S-806 (при ускоряющем напряжении 20 кВ).

На рис. 1 показаны электронно-микроскопические изображения поверхности (рис. 1, a), сечения (рис. $1, \delta$) и обратной стороны (рис. $1, \epsilon$) нанопористых подложек из анодного оксида алюминия, изготовленных по разработанной методике.

Основные этапы изготовления чувствительного элемента гироскопа

На рис. 2 показаны основные детали ЧЭ гироскопа из нанопористого анодного оксида алюминия. Для чувствительного элемента использовали подложки толщиной 100 мкм, объемная пористость которых не превышала 10-12 %. Технологический процесс включал изготовление следующих деталей чувствительного элемента: кристалл на основе Al_2O_3 (рис. 2, a), рамка из Al_2O_3 (рис. 2, б) и обкладки из стекла ЛК-105 (рис. 2, в и г). При изготовлении кристалла первоначально методом фотолитографии на поверхности алюмооксидной подложки формировалась топология металлизации. Затем сквозным жидкостным травлением одновременно вытравливали элементы кристалла: кольцо, спицы и контур. Размер контура сформированного кристалла был 10 × 10 мм с расстоянием между вершинами восьмигранника в 8.8 мм (рис. 2, а). Кольцо имело наружный диаметром 6 мм и в сечении представляло собой четырехугольник со сторонами, равными 100 мкм. Спицы так же как и кольцо в сечении представляли собой четырехугольник 100 × 100 мкм. Форма рамки соответствовала размеру кристалла с расстоянием между вершинами восьмигранника в 9 мм (рис. 2, δ).

Общая толщина алюмооксидной рамки и кристалла варьировалась от 200 до 450 мкм. Верхняя и

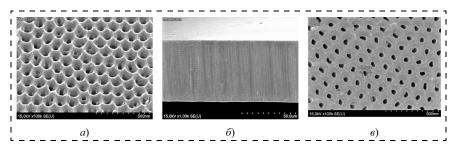


Рис. 1. СЭМ-фото поверхности (a), поперечного сечения (b) и обратной стороны (b) подложек из нанопористого анодного оксида алюминия

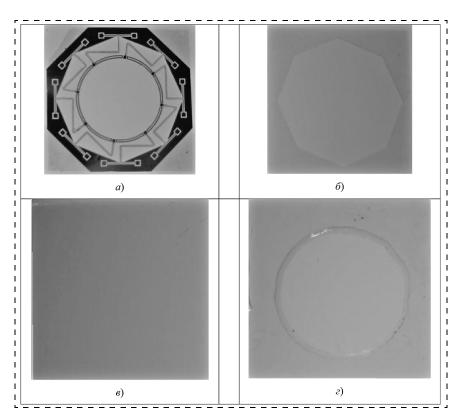


Рис. 2. Составляющие чувствительного элемента кольцевого гироскопа: a — кристалл из Al_2O_3 ; δ — рамка из Al_2O_3 ; δ и ϵ — обкладки из стекла ЛК-105

нижняя обкладки имели размер 13×13 мм, при этом в нижней обкладке было вытравлено отверстие диаметром 10 мм. Сборку отдельных деталей макета гироскопического сенсора в последовательности верхняя обкладка (рис. 2, θ), рамка (рис. 2, θ), кристалл (рис. 2, θ) и нижняя обкладка (рис. 2, θ) проводили методом низкотемпературной пайки.

С помощью метода конечных элементов осуществлено моделирование основных характеристик кольцевого гироскопа с чувствительным элементом, изготовленным с использованием нанопористого анодного оксида алюминия.

Постановка задачи для моделирования и описание работы микрогироскопа

Для моделирования использовали геометрическую 3D-модель чувствительного элемента, созданную в CAD SolidWorks (рис. 3, см. третью сторону обложки).

В сечении кольца и спиц чувствительного элемента лежит квадрат с размерами сторон 100×100 мкм, диаметр описанной окружности вокруг восьмигранника — 10 мм, толщина подложки 380 мкм, диаметр кольца — 6 мм.

С помощью метода конечных элементов необходимо было рассчитать рабочую моду и резонансную частоту для чувствительного элемента, установить изменения для значений резонансной частоты в зависимости от пористости и толщины спиц. Кроме того, необходимо найти механические деформации, которые возникают при приложении угловой скоро-

сти 6,28 рад/с и ударного ускорения 5000 g, а также сравнить возникающие деформации при ударном ускорении с деформациями, которые возникают в чувствительном элементе из кремния.

Принцип работы чувствительного элемента микрогироскопа следующий: в кольцевом резонаторе возбуждаются колебания, имеющие форму стоячей волны. При вращении резонатора вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа, момент сил инерции Кориолиса вызывает прецессию (вращение) стоячей волны относительно резонатора. Определяя положение стоячей волны, зависящее от угловой скорости, относительно опорной рамки, можно получить информацию об угле поворота основания гироскопа в инерциальном пространстве [5].

Моделирование параметров функционирования микромеханического гироскопа

На рис. 4 и 5 (см. третью и четвертую сторону обложки) показаны моды собственных колебаний ЧЭ,

изготовленного из нанопористого анодного оксида алюминия. Из результатов моделирования видно, что рабочий режим гироскопа достигается на 6-й резонансной моде, т. е. на частоте 16945 Гц.

Далее были рассчитаны зависимости частотных характеристик чувствительного элемента гироскопа от пористости исходного анодного оксида алюминия. На рис. 6 показаны зависимости от пористости для двух (1-й и 6-й) резонансных мод.

Из рис. 6 видно, что выбирая заранее алюмооксидную подложку с определенным значением пористости, можно получить резонансную частоту чувствительного элемента на 6-й резонансной моде в диапазоне от 16,5 до 23 кГц.

На рис. 7 показаны зависимости резонансной частоты чувствительного элемента от пористости и толщины спицы. Толщину спицы выбирали равной 50, 100, 200 и 400 мкм для 1-й и 2-й мод. Из данного рисунка также следует, что варьируя не только значе-

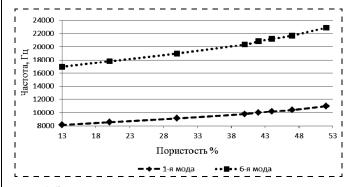


Рис. 6. Зависимость частотных характеристик чувствительного элемента от пористости анодного оксида алюминия

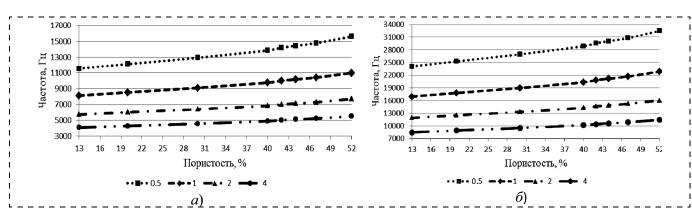


Рис. 7. Зависимости резонансной частоты чувствительного элемента от пористости и толщины спицы: a- для 1-й моды; b- для 6-й моды

нием пористости алюмооксидной подложки, но и геометрическими размерами компонентов чувствительного элемента гироскопа, можно целенаправленно задавать резонансную частоту рабочей моды.

Важным является вопрос о том, достаточно ли прочны к механическим нагрузкам детали чувствительного элемента гироскопа (спицы и кольцо), выполненные из нанопористого анодного оксида алюминия, и места их соединений. Для этого проводилось моделирование режима работы микрогироскопа при вращении чувствительного элемента с угловой скоростью 6,28 рад/с. На рис. 8 показан результат этого моделирования. Как видно, деформации, возникающие при вращении чувствительного элемента, чрезвычайно малы и не могут привести к какому-либо изменению формы кольца и тем более к его разрушению или образованию трещин.

На рис. 9 (см. четвертую сторону обложки) приведены результаты моделирования воздействия ударного ускорения в 5000 g на чувствительный элемент гироскопа, изготовленного из нанопористого анодного оксида алюминия.

Из рис. 9 видно, что при воздействии ударного ускорения наибольшие деформации возникают в местах соединения спиц с контуром чувствительного элемента. Их значение составляет $3,74 \cdot 10^{-7}$. Для сравнения, аналогичный расчет был сделан для чувствительного элемента гироскопа, изготовленного из монокристаллического кремния. В этом случае зна-

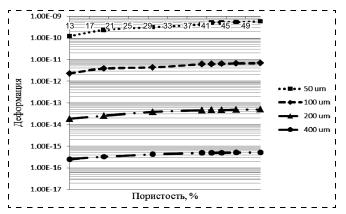


Рис. 8. Результаты моделирования возникающих механических деформаций в чувствительном элементе при приложении к нему угловой скорости 6,28 рад/с

чение деформации оказалось равным $\sim 6,57 \cdot 10^{-7}$, что почти в 2 раза больше, чем в чувствительном элементе гироскопа, изготовленного из нанопористого анодного оксида алюминия.

Заключение

Разработана и опробована технология изготовления чувствительного элемента кольцевого гироскопа из нанопористого анодного оксида алюминия.

Путем моделирования показано, что рабочему режиму чувствительного элемента соответствует колебания на 6-й резонансной моде. Определена зависимость резонансной частоты чувствительного элемента от значений пористости и толщины спицы.

Показано поведение чувствительного элемента и значения возникающих деформаций в нем при приложении угловой скорости, равной ~6,28 рад/с.

Оценены значения механических деформаций, которые возникают в чувствительных элементах из нанопористого анодного оксида алюминия и монокристаллического кремния при воздействии ударного ускорения 5000 g. Показано, что механические деформации по фон Мизесу в 2 раза ниже в чувствительном элементе, изготовленном из нанопористого анодного оксида алюминия.

Работа частично финансировалась в рамках задания 1.2.2 научно-технической программы Союзного государства "Нанотехнология — $C\Gamma$ ".

Список литературы

- 1. Khatko V., Gorokh G., Mozalev A., Solovei D., Llobet E., Vilanova X., Correig X. Tungsten Trioxide Sensing Layers on Highly Ordered Nanoporous Alumina Templates // Sensors and Actuators B: Chemical. 2006. V. 118. P. 255—262.
- 2. **Белогуров Е. А., Шукевич Я. И., Баркалин В. В., Хатько В. В., Таратын И. А.** Конструирование газовых микросистем на основе нанопористого анодного оксида алюминия // Приборы и методы измерений. 2011. № 2 (3). С. 59—65.
- 3. Баркалин В. В., Белогуров Е. А., Таратын И. А., Хатько В. В., Шукевич Я. И. Конечно-элементное моделирование термомеханических свойств нанопористых материалов // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 1 (126). С. 18—24.
- 4. **Соловей Д. В., Мозалев А. М., Горох Г. Г.** Формирование высокоупорядоченных матриц анодного оксида алюминия заданной толщины и морфологии // Доклады БГУ-ИР. 2008. № 6 (36). С. 65—73.
- 5. **Располов В. Я.** Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.



А. С. Сергеева, аспирант, **Д. Н. Плешков**, аспирант,

Д. А. Горин, д-р хим. наук, доц., проф. каф., Саратовский государственный университет, e-mail: gorinda@mail.ru

МИКРО-И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Поступила в редакцию 02.11.2012

Представлены современные достижения и основные тенденции развития полупроводниковой фотоэнергетики. Рассмотрены различные структуры новых типов фотоэлектрических преобразователей, принцип их работы, характеристики, особенности технологии изготовления. Обсуждаются новые направления полупроводниковой фотоэнергетики, которые связаны с использованием фотонных кристаллов, многослойных волокон, плазмоннорезонансных структур, микрочастиц "ядро-оболочка".

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи, сферические солнечные батареи, нанопроволоки, фотонные кристаллы, многослойные волокна, плазмонно-резонансные структуры

Введение

В связи с постоянным ростом мирового спроса на электрическую энергию актуальным становится вопрос использования альтернативных ее источников, одним из которых является энергия Солнца, преобразующаяся в электрическую с использофотоэлектрических преобразователей (ФП). В настоящее время основой фотоэлектрических преобразователей, применяемых на практике, являются неорганические полупроводниковые материалы, причем около 98 % рынка занимают кристаллический и аморфный кремний [1]. Но производство кремниевых солнечных элементов является достаточно сложным, что обусловливает их высокую цену. В связи с этим сейчас во всем мире активно изучают органические солнечные батареи, которые могут позволить снизить цену преобразования энергии Солнца в электрическую вследствие простоты технологии их изготовления и малых затрат при производстве. К достоинствам органических фотоэлементов также относятся легкость, высокая экологическая устойчивость, гибкость, возможность изменять цвет органических солнечных элементов для дизайнерских целей [2, 3]. Известно о создании прозрачных солнечных батарей (СБ), которые предполагается применять, например, для заряда батареи мобильных телефонов, плееров при расположении самих элементов непосредственно на экране гаджета. Кроме того, активно изучаются перспективы использования для создания фотопреобразующих устройств полупроводников A_2B_6 , а также гибридные материалы, сочетающие в себе неорганические наноструктуры в полимерной матрице [4—9].

В последние годы помимо вариации материалов для создания СБ исследуют и их различные типы. Например, возможно использование наноструктурированных фотонных кристаллов, что позволяет улучшить параметры устройств [10—12] по сравнению с параметрами стандартных плоских фотоэлементов [13]. Авторы работ [14—16] описывают сферические СБ, которые уже выпускают промышленно. Также созданы гибкие фотоэлектрические элементы, которые могут быть скатаны в рулон, что значительно упрощает их транспортировку, повышает прочность. Авторы работ [17—19] рассматривали идею создания СБ на основе упорядоченных массивов нанопроводов. Подробнее об этих устройствах сообщено далее.

1. Типы фотоэлектрических преобразователей

В общем случае фотоэлектрические преобразователи можно разделить на три группы [1]:

- *батареи "слоистого типа"*, в которых фотоактивные компоненты наносят отдельными слоями; процесс разделения зарядов протекает на границе раздела слоев донора и акцептора;
- батареи с "объемным гетеропереходом", в которых есть только один фотоактивный слой, представляющий собой смесь донора и акцептора; разделение зарядов происходит по всему объему активного слоя батареи, где есть контакт донора и акцептора;
- тандемные батареи, в которых можно выделить две или более наложенные друг на друга (находящиеся в "стопке") ячейки, которые являются последовательно соединенными, так как в них имеется общий электрод, играющий роль катода для одной ячейки и анода для другой.

В последние годы многие исследователи занимаются созданием тонкопленочных органических СБ. По сути, создание фотоэлектрических преобразователей в данном случае сводится к формированию многослойных структур с использованием следующих методов: центрифугирование, технология Ленгмюра—Блоджетт, плазменное и вакуумное осаждение [3, 20—24]. Одним из методов формирования наноструктурированных пленок является метод послойного осаждения молекул полиэлектролитов и/или наночастиц [21, 22]. Следует отметить, что в результате получаются многослойные пленки с заданной структурой, толщиной и морфологией [23, 24].

Для органических СБ с объемным гетеропереходом перспективными материалами являются соединения фуллеренов (*n*-тип) и полисопряженные полимеры (*p*-тип). Помимо полисопряженных по-



лимеров в качестве полупроводников *p*-типа используют полупроводниковые нанокристаллы, которые вводят в матрицу полимера [25]. Такие батареи получили название гибридные, так как в них используют и органические, и неорганические полупроводники.

1.1. СБ на основе структуры фотонного кристалла

Фотонно-кристаллические (ФК) волокна представляют собой кварцевую или стеклянную микроструктуру с периодической либо апериодической системой цилиндрических воздушных отверстий, ориентированных вдоль оси волокна [26]. Дефект микроструктуры, соответствующий отсутствию одного или нескольких воздушных отверстий, служит сердцевиной волокна, обеспечивая волноводный режим распространения электромагнитного излучения. Микроструктуру фотонных кристаллов обычно получают путем вытяжки при высокой температуре из преформы, набранной из полых капилляров [26].

Оптические свойства полимерных фотонных кристаллов, и в первую очередь, положение и ширину их фотонных запрещенных зон (ФЗЗ) легко варьировать, изменяя диаметр частиц и природу полимерной основы [27]. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в понимании оптических явлений в ФК структурах, крупномасштабное изготовление высококачественных ФК структур остается проблемой, в связи с чем ведутся разработки новых методов их получения [28, 29].

Ключевым преимуществом воздушно-структурированных ФК волокон для многих приложений является возможность заполнить отверстия полупроводниковыми материалами, т. е. микроструктурированная оболочка волокна может использоваться в виде матрицы микрокапилляров, заполняемых предельно малым объемом полупроводника [30—32].

В работе [32] предложена модель капиллярного заполнения, позволяющая провести расчет времени, необходимого для заполнения одного или нескольких конкретных отверстий в ФК волокнах определенной жидкостью. Авторы [30] изменяли оптические свойства ФК волокон путем заполнения отверстий жидкостями с показателями преломления, которые имеют сильную температурную зависимость. Авторы [31] заполняли микрокапилляры различными веществами, в том числе н-гептаном и метанолом.

Эффективное управление поглощением света за счет уменьшения отражения падающего излучения при одновременном повышении оптического поглощения имеет большое значение для всех фотоэлектрических устройств. В связи с этим проводятся исследования фотоэлектрических элементов с использованием структур фотонных кристаллов [10—12].

Основным путем повышения эффективности тонкопленочных солнечных элементов является увеличение числа поглощаемых фотонов [6]. Это обычно достигается созданием текстуры на задней (нижней) металлической пластине ячейки, которая рассеивает свет внутри поглощающего слоя и увеличивает вероятность поглощения фотона. В работе [12] диэлектрические фотонные кристаллы использовали для моделирования новых схем захвата фотонов α-Si:Н тонкопленочными солнечными элементами (α-Si:Н выступает как удобный прототип, сам анализ может быть применен к любой тонкопленочной солнечной ячейке). Особенностью конфигурации фотоэлектрической ячейки (рис. 1) является сочетание дифракционной решетки двумерного фотонного кристалла и распределяющих брегговских отражателей (РБО), что позволяет эффективно поглощать фотоны, исключая потери, связанные с текстурой металлических отражателей [12]. Фотонный 2D-кристалл, расположенный между поглощающим слоем и РБО, отклоняет (рассеивает) свет под наклонным углом в поглощающий слой (см. рис. 1). При этом геометрические параметры фотонного кристалла оптимизированы для достижения максимального поглощения.

Заслуживающие внимания результаты были получены в работе [10], где были исследованы новые наноразмерные "куполовидные" солнечные батареи (рис. 2). Для данных устройств наблюдали эффективное уменьшение отражения и повышение поглощения в широком спектральном диапазоне: слой аморфного кремния (α-Si:H) толщиной всего 280 нм может поглотить 94 % света с длиной волны 400...800 нм, что значительно выше, чем 65 % поглощения для плоской пленки [10]. Благодаря эффективному поглощению света получен значительный ток короткого замыкания ~17,5 мА/см², а достигаемый КПД ~5,9 % (на 25 % выше, чем в плоских пленках) [10].

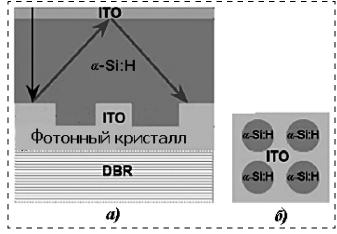


Рис. 1. Схематичное изображение конфигурации фотоэлектрической ячейки:

a — верхний слой ITO, фотонный 2D-кристалл, нижний ITO и распределяющий брегговский отражатель (DBR); δ — вид сверху слоя решетки фотонного 2D-кристалла с цилиндрами α -Si:H на фоне ITO [12]



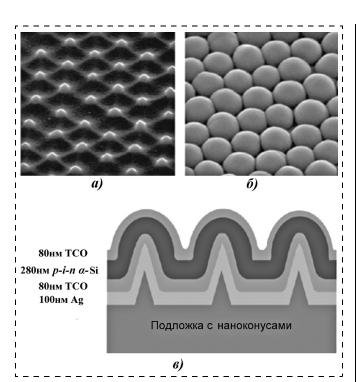


Рис. 2. Изображения "куполовидных" СБ:

a — СЭМ-изображение (под углом 45°) текстурированной кварцевой подложки с наноконусами; δ — СЭМ-изображение (под углом 45°) подложки после осаждения материалов; ϵ — схематичное изображение поперечного сечения структуры СБ; α - Si:H — аморфный гидрогенизированный кремний; ТСО — транспортный проводящий оксид; Ag — заднее отражающее покрытие из серебра [10]

Повышенное поглощение света остается эффективным в широком диапазоне углов падения, что благоприятно для реальных условий функционирования СБ. Данные структуры в принципе не ограничены какими-либо конкретными материалами, их изготовление совместимо с большинством налаженных производств СБ, и это открывает возможности для дальнейшего повышения КПД СБ, уменьшения расхода используемых материалов при их производстве. Наконец, такие "куполовидные" устройства при модификации их гидрофобными молекулами представляют собой практически супергидрофобные поверхности, и таким образом дают возможность создания стойких к загрязнению солнечных батарей в процессе их эксплуатации [10].

Авторы работы [11] продемонстрировали возможность создания солнечных элементов, представляющих собой цилиндрический фотонный кристалл, и показали, что данные структуры относительно плоских ячеек проявляют трехкратное повышение поглощения в определенных областях солнечного спектра (в частности, поглощение повышается в 3,5 раза для ячеек на фотонных кристаллах для $\lambda = 660$ нм) [11]. Наблюдается повышение эффективности на ~70 %, что обусловлено не только увеличением поглощения, но и улучшением электрических параметров, таких как фактор

заполнения (FF), напряжение холостого хода ($V_{\rm oc}$) примерно на 10 % [11].

В работе [20] был выбран материал и описано получение термо- и светочувствительных волокон. Авторы показывают процессы формирования специальных структурированных заготовок-преформ в виде стержней: полупроводниковые, металлические и изоляционные компоненты в них расположены различным образом [20]. Затем при высокой температуре в вязком состоянии выполняли вытягивание километровых наноструктурированных волокон (гибкие, легкие, недорогие волокна). Схема пошагового изготовления волокон изображена на рис. 3. В процессе производства таких наноструктурированных устройств используют халькогенидные стекла (в качестве полупроводниковой основы), оловянные металлические электроды и однородные тонкие полимерные пленки. На первом этапе из элементарных компонентов при высокой

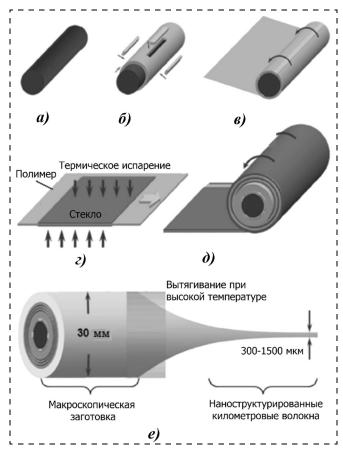


Рис. 3. Этапы изготовления наноструктурированных волокон:

a — аморфные халькогенидные стекла, которые синтезируются из элементов в вакуумной кварцевой ампуле (700...900 °C); δ — стеклянный стержень, который комплектуется изоляционной полимерной оболочкой и четырьмя металлическими электродами; ϵ — лист полимера, скатывающийся вокруг структуры для ограничения металлических каналов внутри полимера; ϵ — халькогенидное стекло с высоким показателем преломления термически испаряется равномерно на обе стороны тонкой полимерной пленки; δ — полученная пленка скатывается вокруг структуры, полученной в пункте ϵ , окончательная структура затем термически объединяется в вакуумной печи для получения твердой заготовки-стержня; ϵ — заготовка вытягивается при температуре размягчения для получения километровых мезоскопических волокон, содержащих наноструктуры [20]

температуре (700...900 °C) синтезируется полупроводниковый стержень (рис. 3, а). Далее он комплектуется изоляционной полимерной оболочкой, в которой делают четыре щели — в этих отверстиях располагают металлические электроды (рис. 3, δ). На третьем этапе полученную заготовку окружают несколькими слоями полимерной пленки (рис. 3, в). С помощью технологии термического испарения на полимерные пленки (20 см ширины и 8...50 мкм толщины) с обеих сторон осаждаются халькогенидные стекла (1,5...15 мкм толщины), после чего данной структурой покрывают заготовку, полученную на предыдущем третьем этапе (рис. 3, $\varepsilon - \partial$). Наконец, на последнем этапе сформированные многокомпонентные стержни при высокой температуре вытягиваются в микро- и наноструктурированные волокна километровой длины (рис. 3, е).

Авторы также представляют новую методологию для создания фотопреобразователей больших площадей с помощью гибких, недорогих, легких, механически жестких и 1D-фотоприемников [20]. В основе подхода лежит структура наноструктурированного волокна, полученного из макроскопических заготовок (33 мм толщины и 20 см длины), состоящих из цилиндрических полупроводниковых халькогенидных стеклянных основ (АСТ-Sn), связанных с четырьмя оловянными (Sn) металлическими каналами, которые заключены в защитные оболочки полиэфирсульфоната (PES) [20].

1.2. СБ на основе массивов нанопроволок

Нанопроволочные солнечные батареи также имеют ряд преимуществ перед традиционными бислойными устройствами.

В работе [19] представлен новый дизайн СБ, сочетающий в себе геометрию нанопроволочных фотоэлектрических элементов с концепцией использования экологически чистых, недорогих и прочных полупроводников. Солнечная ячейка состоит из вертикально ориентированных нанопроводов оксида цинка ZnO *n*-типа, окруженных пленкой из наночастиц оксида меди Си₂О р-типа [19]. С учетом оптимальных масштабов характерных размеров элементов структуры для поглощения света и диффузии экситонов можно создать устройство с относительно толстым поглощающим слоем (для эффективного поглощения фотонов) и небольшим расстоянием между проводами (меньше длины диффузии экситонов). Авторы работы [19] обнаружили, что эффективность фотоэлектрической ячейки повышается при добавлении промежуточного изолирующего слоя оксида между нанопроволокой и наночастицами. Авторы работы [18] также рассматривали идею создания СБ на основе упорядоченных массивов нанопроводов с гетеропереходами оксид цинка ZnO (*n*-тип) — оксид меди Cu_2O (*p*-тип). По тому же принципу создан гибридный материал, представляющий собой кремниевые наностержни *п*-типа, покрытые полимерным слоем, имеющим дырочную проводимость (PEDOT:PSS) [33]. Авторам работы [33] удалось достичь эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую, равной 8,40 %. В работах [34, 35] также описано создание солнечных батарей на основе массивов кремниевых наностержней.

Необходимым условием для эффективной инжекции зарядов в тонкопленочном устройстве является близость энергий Ферми материалов, входящих в структуры. С этой целью в подобного рода структуры часто вводят дополнительные проводящие слои. По этому же принципу идет развитие технологии создания многослойных покрытий для структур типа наностержней. Так, в работе [5] описываются преимущества ультратонких солнечных элементов co структурой активного ZnO/CdSe/CuSCN (рис 4). В описанной в работе структуре с помощью просвечивающего электронного микроскопа определена толщина покрытия CdSe 40...45 нм. При получении фотопреобразователей были использованы различные техники, такие как химическое осаждение СВД, золь-гель, адсорбция и реакция ионного слоя SILAR, электроосаждение [36]. В англоязычной литературе описываются ультратонкие слои на основе полупроводниковых наностержней (в СБ они являются поглощающим слоем), обычно они представляют собой массивы нанопроволок типа ядро—оболочка [37].

Поскольку материалы разного типа проводимости имеют различные оптические характеристики, эффективным представляется метод сочетания нескольких поглощающих слоев разной природы в одном устройстве. Эта идея была реализована при создании двуслойного солнечного элемента на базе

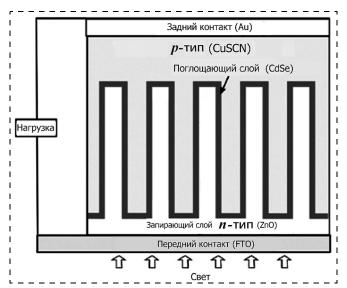


Рис. 4. Схема солнечного элемента с пространственным гетеропереходом с ультратонким поглощающим слоем CdSe:

в качестве полупроводника n-типа выступает прозрачный слой нанострежней ZnO, в качестве p-типа — прозрачный слой CuSCN [5]

Mc713

слоя нанотрубок и наностержней TiO_2 [41]. Показано значительное уменьшение эффекта отражения по сравнению однослойными структурами. Аналогичное исследование было проведено для структуры ZnO/TiO_2 , где было показано улучшение транспортных свойств при покрытии наностержней ZnO наностержнями TiO_2 [42].

Интересная геометрия гетероперехода предложена в работе [43]. Реализован так называемый фрактальный переход между нанокластерами *n*- и *p*-типа. Исследование проводили на кластерах CdS и Cu₂S. Методом компьютерного моделирования показано, что реализованный переход имеет ряд преимуществ, таких как оптимальный транспорт зарядов, возможность генерации множественных электрон-дырочных пар и отсутствие жестких требований к чистоте материала. Пленки наносили методом центрифугирования (*spin-coating*).

Безусловно, одним из важнейших параметров солнечного элемента является его способность поглощать свет, причем преимущественно в видимой области. В связи с этим активно разрабатываются методы повышения отношения поглощение/отражение. Так, в работе [44] рассмотрено влияние антиотражающих покрытий для массивов кремниевых наностержней. Показано, что нанесение слоя Ті/Ад на поверхность наностержней приводит к увеличению квантовой эффективности устройства более чем в 2 раза. Авторы работы [45] моделировали наиболее часто встречающиеся дефекты при производстве кремниевых наностержней, такие как вертикальное, горизонтальное разупорядочение, разброс значений диаметра и длины стержней, использование разных типов электродов. Так, например, показано, что разброс в ориентации стержней приводит к уменьшению эффекта поглощения, тогда как разупорядочение в радиусе приводит к увеличению этого эффекта.

Оксид цинка является, пожалуй, вторым по популярности после кремния материалом в фотовольтаике, поскольку это важнейший проводящий прозрачный оксид, он дешевый и существует много различных отработанных методик по созданию наноструктурированных материалов на его основе [46]. В работе [17] рассматривают оксид цинка в различных формах: его используют в качестве материала фотоанода в виде наночастиц, наностержней, нанотрубок, нанопроводов, наноцветов, нанолистов, нанолент и др.

Достаточно много внимания в настоящее время уделено углеродным нанотрубкам, которые, в частности, можно использовать и при создании солнечных элементов. Есть работы, где массивы нанотрубок используют в качестве одного из электродов [47], в которых речь идет о полностью углеродных девайсах [48—52].

1.3. Сферические солнечные батареи

Солнечный свет поступает в каждую сферическую ячейку СБ со всех сторон в виде прямого излучения, отраженного и рассеянного. Чтобы плоские модули обеспечивали максимально возможное поглощение солнечного света, выбирают оптимальный азимут и угол наклона светоприемной панели. Однако с движением Солнца угол падения изменяется, увеличивается отражение от светоприемных поверхностей, уменьшается входная мощность излучения [14]. Чтобы увеличить эффективность преобразования ФП должен использовать солнечный свет, поступающий со всех направлений [14—16].

Таким образом, плоские солнечные элементы являются более эффективными для поглощения прямого излучения, в то время как при рассеянном свете (например облачности) выгоднее использовать сферические ФП. Сферические солнечные микроэлементы обладают этим достоинством, они имеют светоприемную поверхность, охватывающую всю сферу (за исключением электродов, естественно), что позволяет увеличить эффективность поглощения света и, как следствие, повысить КПД устройства [14—16]. Схематическое изображение такой сферической СБ представлено на рис. 5. Ячейки образованы из кремния, сформированного в сферы с p-n-переходами на всей поверхности (плоскость перехода параллельна поверхности). Микросферы имеют диаметр около 1 мм (до 2 мм), что повышает отношение площади поверхности к объему и, соответственно, увеличивает эффективность преобразования солнечной энергии в электриче-

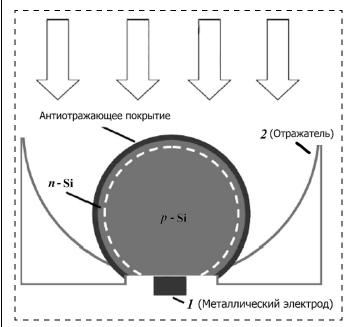


Рис. 5. Схематичное изображение сферической кремниевой ячейки: I — металлический электрод к кремнию p-типа проводимости; 2 — отражатель, одновременно играющий роль контакта к кремнию n-типа проводимости [62]

скую [14, 15]. Маленький размер микросферических ячеек позволяет создавать модули различной формы, а также прозрачные и гибкие модули [16]. Использование частиц сферической формы для создания СБ позволяет обеспечить большую светоприемную поверхность и протяженную область пространственного заряда, тем самым увеличивая эффективность работы СБ. Монокристаллы изготавливают путем плавления гранулированных поликристаллов кремния (диаметр гранул 0,5...2 мм) в плавильном агрегате, после чего жидкий кремний падает с высоты 14 м и за 1,5 с в условиях невесомости частицы превращаются в сферы под действием сил поверхностного натяжения [14, 15]. Во время плавления объем кремния сжимается, и примеси испаряются с расплавленной жидкой поверхности. Примесь с поверхности сферических частиц кремния в твердой фазе (после процесса кристаллизации) удаляют последующими процессами травления [14, 15]. Такая технология производства сферических ячеек устраняет обычные производственные процессы (такие как температурное вытягивание монокристаллических слитков из преформ и их нарезку), таким образом снижая себестоимость продукции за счет экономии электрической энергии [14, 15]. К достоинствам данной технологии создания СБ относятся простота, экономия ресурсов и энергии, малые затраты на обработку, получение высококачественного продукта, экономия времени. Применение сферических СБ подробнее описано в работе [16].

Так же как и в тонкопленочных материалах в структурах ядро—оболочка возможно применение антиотражающих покрытий [54]. В качестве ядра выступают двуслойные частицы кремния (слой *n*- и *р*типа); оболочкой, выполняющей функции антиотражающего покрытия, является CdS, но авторы отмечают, что это не самый оптимальный материал для создания антиотражающих покрытий, хотя его использование обеспечивает увеличение поглощения света на 16 % по сравнению с образцом без покрытия. С помощью сканирующей электронной микроскопии показана равномерность структуры антиотражающего покрытия, которая была получена методом химического осаждения из жидкой фазы.

Возможно использование массивов микросфер для создания функциональных компонентов микроэлектроники [55]. Также запатентована структура, представляющая собой многослойные микросферы, которые могут быть заключены в поршень [56]. К нему можно приложить различное давление, вследствие чего микросферы деформируются, что приводит к изменению площади контактов, и как следствие, уменьшает сопротивление данных структур. Если в качестве дополнительного слоя-оболочки нанести на сферы фотоактивный слой, устройство может работать в качестве фотодетектора [56].

1.4. Плазменные светопоглощающие конструкции СБ

В работе [61] предложен новый метод для увеличения эффективности поглощения света в тонкопленочных СБ, который заключается в использовании эффекта поверхностного плазмонного резонанса. Таким образом, становится возможным создание оптически толстого, но очень тонкого физически слоя фотоэлектрического поглотителя, так что очень тонкие фотоэлектрически активные слои (~10...100 нм) могут поглотить излучение в широком спектральном диапазоне, который соответствует солнечному спектру [61]. Это реализуется благодаря захвату света через резонансное рассеяние в массивах металлических наночастиц. Вследствие малой требуемой толщины активного слоя могут быть использованы относительно нечистые и дефектные полупроводники (поликристаллические пленки кремния, Cu₂O, Zn_3P_2 , SiC), поскольку при данных толщинах слоя практически сведена к минимуму рекомбинация носителей заряда в объеме полупроводника [61].

С помощью плазмонных конструкций возможно создание совершенно новых структур СБ (рис. 6).

Во-первых, "тандемная" конструкция СБ (рис. 6, *a*): она представляет собой сэндвич-структуру из полупроводников с разной шириной запрещенной зоны, разделенных слоем контакта металла с плазмонной наноструктурой (*light trapping*), задача которой сводится к захвату фотонов с энергией, оптимальной для фотоактивного поглощения в соответствующем полупроводниковом слое [61].

Во-вторых, конструкция солнечных элементов на квантовых точках, она предназначена для увеличения фотопоглощения в сверхтонких слоях квантовых точек, которые связываются в моды поверхностных плазмонов поляритонов (ППП), распространяющихся в плоскости взаимодействия между слоем серебра (Ag) и слоем квантовых точек (они встроены в МДМ (металл/диэлектрик/металл)-волноводы ППП) [61] (рис. 6, б). Такие ячейки выгодны ввиду возможности управления значением ширины запрещенной зоны полупроводника путем варьирования размера частиц. Но эффективное поглощение света требует толстого слоя квантовых точек, через который уже будет затруднен перенос носителей заряда.

В-третьих, недавно в наноразмерных плазмонных солнечных ячейках в зазор между ветвями плазмонных антенн были интегрированы органические фотоэлектрические поглотители излучения: свет собирается в наноразмерных щелях между двумя группами антенн, и фототок генерируется в полупроводниковом (поли3-гексилтиофене) (РЗИТ) [61] (рис. 6, в). Другой пример плазмонных антенн — это коаксильные отверстия, изготовленные в металлической пленке (локализованные плазмонные моды за счет резонансов Фабри-Перо) (рис. 6, в). Такие наноструктуры с внутренним полем в области простран-



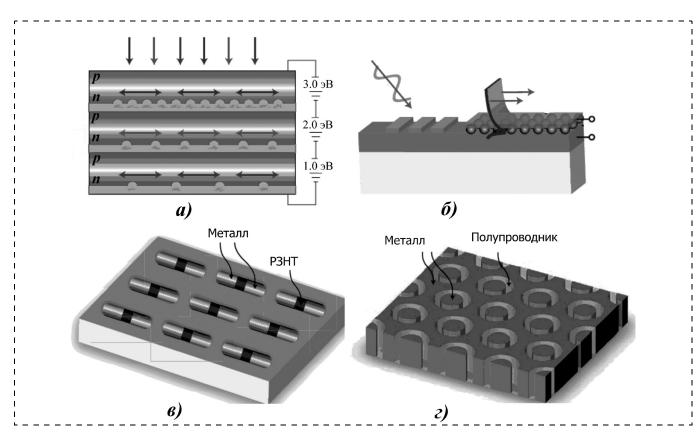


Рис. 6. Новые конструкции плазменных СБ:

a — "тандемная" СБ; δ — плазмонная СБ на квантовых точках; ϵ — оптическая антенная решетка из осевой гетероструктуры металла и поли(3-гексилтиофена) (РЗНТ); ϵ — массив коаксиальных отверстий в металлической пленке, которая поддерживает локализованные плазмонные моды Фабри—Перо [61

ственного заряда, увеличенным в 50 раз, могут быть использованы в совершенно новых конструкциях СБ, где недорогие полупроводники с малым временем жизни неосновных носителей заряда встроены в плазмонные полости, и носители собираются металлами на внутренней и внешней сторонах коаксиальных отверстий [61].

Заключение

В настоящее время внимание исследователей все больше привлекают нестандартные решения в области создания солнечных элементов с использованием наноструктурированных материалов, таких как фотонные кристаллы [10—12, 17—19], многослойные волокна [20], структуры "ядро—оболочка" сферической формы [14—16, 62], многослойные структуры, межфазные границы которых содержат плазмонно-резонансные наночастицы [61]. Перечисленные выше способы повышения эффективности фотоэлектрического преобразования сводятся по сути к оптимизации оптического поглощения, а также процессов переноса и разделения носителей заряда.

Список литературы

1. **Трошин П. А., Любовская Р. Н., Разумов В. Ф.** Органические солнечные батареи: структура, материалы, критические параметры и перспективы развития // Российские нанотехнологии. 2008. Т. 3. N 5—6. С. 56—77.

- 2. **Egginger M.** Zn-Phthalocyanine / C60 Solar Cells: Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades. Linz, 2005. 76 p.
- 3. **Chevapevski O., Larina L., Myong S. Y.** et al. Alternative molecular semiconductors for sensitizing nanocrystalline solar cells // IEEE. 2002. P. 1318—1321.
- 4. **Zhang Y., Wu Z., Zheng J.** et al. ZnO/ZnSe type II coreshell nanowire array solar cell // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2012. V. 102. P. 15—18.
- 5. **Majidi H., Baxter J. B.** Electrodeposition of CdSe coatings on ZnO nanowire arrays for extremely thin absorber solar cells // Electrochimica Acta. 2011. N 56. P. 2703—2711.
- 6. **Salazar R., Delamoreanu A., Lévy-Clément C**. ZnO/CdTe and ZnP/CdS core-shell nanowire arrays for extremely thin absorber solar cells // Energy Procedia. 2011. № 10. P. 122—127.
- 7. **Syu H.-J., Shiu S.-C., Lin C.-F.** Silicon nanowire/organic hybrid solar cell with efficiency of 8,40 % // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2012. N 98. P. 267—272.

 8. **Davenas J., Beyou E., Balloffet A.** Silicon nanowire/poly(3-
- 8. **Davenas J., Beyou E., Balloffet A.** Silicon nanowire/poly(3-hexylthiophene) hybrids for thin film solar cells // Journal of Non-Crystalline Solids. 2011. V. 358. N 17. P. 2534—2536.
- 9. **Huang J.-S., Hsiao C.-Y., Syu S.-J.** et al. Well-aligned single-crystalline silicon nanowire hybrid solar cells on glass // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2009. N 93. P. 621—624.
- 10. **Zhu J., Hsu C. M., Yu Z.** et al. Nanodome Solar Cells with Efficient Light Management and Self-Cleaning // Nano Lett. 2010. V. 6. № 9. P. 1979—84.
- 11. **Ko D. H., Tumbleston J. R., Zhang L.** et al. Photonic Crystal Geometry for Organic Solar Cells // Nano Letters. 2009. V. 9. N 7. P. 2742—2746.
- 12. **Zhoul D., Biswas R.** Photonic crystal enhanced light-trapping in thin film solar cells // Journal of Applied Physics. 2008. V. 103. N 9. P. 093102.
- 13. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. Кн. 2: Пер. с англ. 2-е перераб. и доп. изд. М.: Мир, 1984. 456 с.
- 14. **Nakata J.** Soherical Cells Promise to Expand Applications for Solar Power // Asia Electronics Industry (AEI), Dempa Publications. 2001. P. 44—46.



- 15. Nakata J. Spherical Solar Cells Solve Issue of 3-D Sunlight Reception // Asia Electronics Industry (AEI), Dempa Publications. 2003. P. 45-46.
- 16. Taira K. Sphelar Cells Save on Silicon, Capture Light From All Paths // JEİ, Dempa Publications. 2007. P. 26—27
- 17. Uthirakumar A. P. Fabrication of ZnO Based Dye Sensitized Solar Cells // Solar Cells Dye-Sensitized Devices. P. 435—456.
- 18. DeMeo D., MacNaughton S., Sonkusale S. et al. Electrodeposited Copper Oxide and Zinc Oxide Core-Shell Nanowire Photovoltaic Cells // Nanowires Implementations and Applications. 2011. P. 141-156.
- 19. Yuhas B. D., Yang P. Nanowire-Based All-Oxide Solar Cells // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 3756—3761.
- 20. Bayindir M., Abouraddy A. F., Shapira O. et al. Kilometer-Long Ordered Nanophotonic Devices by Preform-to-Fiber Fabrication // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. 2006. V. 12. N 6.
- 21. Decher G., Hong J. D., Schmitt J. Buildup of ultrathin multilayer films by a self-assembly process: III. Consecutively alternating adsorption of anionic and cationic polyelectrolytes on charged surfaces // Thin Solid Films. 1992. P. 831-835.
- 22. Decher G. Fuzzy Nanoassemblies: Toward Layered Polymeric Multicomposites // Science. 1997. V. 277. P. 1232-1237.
- 23. **Grigoriev D., Gorin D., Sukhorukov G.** et al. Polyelectrolyte/magnetite Nanoparticle Multilayers: Preparation and Structure Characterization // Langmuir. 2007. V. 23. P. 12388—12396.
- 24. Gorin D. A., Yashchenok A. M., Manturov A. O. Effect of Layer-by-Layer Electrostatic Assemblies on the Surface Potential and Current Voltage Characteristic of Metal-Insulator-Semiconductor structures // Langmuir. 2009. V. 25. N 21. P. 12529—12534.
- 25. **Huynh W. U., Dittmer J. J., Alivisatos A. P.** Hybrid Nanorod-Polymer Solar Cells // Science. 2002. N 295. P. 2425.
- 26. Желтиков А. М. Развитие технологии фотонно-кристаллических световодов в России // Российские напотехнологии. 2007. Т. 2. № 1—2. С. 70—78.
- 27. Якиманский А. В., Меньшикова А. Ю., Евсеева Т. Г. и др. Монодисперсные полимерные частицы с ковалентно присоединенными хромофорными группировками как структурные элементы фотонных кристаллов // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1, № 1—2. С. 183—190.
- 28. Napolskii K. S., Sapoletova N. A., Gorozhankin D. F. et al. Fabrication of Artificial Opals by Electric-Field-Assisted Vertical Deposition // Langmuir. 2010. V. 4, N 26. P. 2346—2351.
- 29. **Pan F., Zhang J., Cai C.** Rapid Fabrication of Large-Area Colloidal Crystal Monolayers by a Vortical Surface Method // Langmuir. 2006. V. 22, N. 7. P. 7101—7104.
- 30. Spittel R., Mörl K., Lehmann H. et al. Optical properties of liquid filled photonic crystal fibers // Proceedings. DGaO. 2009.
- 31. Sorensen H. R., Canning J., Lagsgaard J. et al. Liquid filling of photonic crystal fibres tor grating writing // Optic Communications. 2007. N 270. P. 207—210.

 32. Nielsen K., Noordegraaf D., Sørensen T. et al. Selective filling of photonic crystal fibres // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2005. N 7. P. L13—L20.
- 33. **Syu H.-J., Shiu S.-C., Lin C.-F.** Silicon nanowire/organic hybrid solar cell with efficiency ot 8,40 % // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2012. N 98. P. 267—272.
- 34. Peng K.., Xu Y., Wu Y. et al. Aligned single-crystalline Si nanowire arrays for photovoltaic applications // Small 1. 2005.
- 35. Sivakov V., Andra G., Gawlik A. et al. Silicon nanowirebased solar cells on glass: synthesis, optical properties, and cell parameters // Nano Letters. 2009. N 9. P. 1549—1554.
- 36. Taretto K., Rau U. Influence of built-in voltage in optimized extremely thin absorber solar eells // Thin Solid Films. 2005. N 480. P. 447—451.
- 37. **Chao H. Y., Cheng J. H., Lu J. Y.** et al Growth and characterization of type-II ZnO/ZnTe core-shell nanowire arrays for solar cell applications // Superlattices and Microstructures. 2010. N 47. P. 160— 164.
- 38. Guo W., Xua C., Zhua G. et al. Optical-fiber/TiO₂nanowire-arrayshybridstructures with tubular counterelectrode for dye-sensitized solar cell // Nano Energy. 2012. N 1. P. 176—182.
- 39. Yu L., O'Donnell B., Foldyna M. et al. Radial junction amorphous silicon solar cells on PECVD-grown silicon nanowires. // Nanotechnology. 2012. V. 23. N 19.

- 40. Qin Z., Huang Y., Liao Q. et al. Stability improvement of the ZnO nanowire array electrode modified with Al₂O₃ and SiO₂ for dye-sensitized solar cells // Materials Letters. 2012. N 70. P. 177—180.
- 41. Wang Y., Yang H., Xu H. DNA-like dye-sensitized solar cells based on ${\rm TiO_2}$ nanowire-covered nanotube bilayer film electrodes // Materials Letters. 2010. N 64. P. 164-166.
- 42. Wang Y., Sun Y., Li K. Dye-sensitized solar cells based on oriented ŽnO nanowire-covered TiO₂ nanoparticle composite film electrodes // Materials Letters. 2009. N 63. P. 1102—1104.
- 43. Годовский Д. Ю., Жилинский П., Касери В. и др.. Исследование фрактального наногетероперехода в тонких пленках на основе наночастиц CdS и Cu₂S // Российские нанотехнологии. 2010. № 7—8. С. 100—106.
- 44. Kumar D., Srivastava S. K., Singh P. K. et al. Fabrication of silicon nanowire arrays based solar cell with improved performance // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2011. N 95. P. 215—218.
- 45. **Lagos N., Sigalas M. M., Niarchos D.** The optical absorption of nanowire arrays // Photonics and Nanostructures Fundamentals and Applications. 2011. N 9. P. 163—167.
- 46. Dittrich T., Belaidi A., Ennaoui A. Concepts of inorganic solid-state nanostructured solar cells // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2011. N 95. P. 1527—1536.
- 47. Kim Y., Mueller-Meskamp L., Zakhidov A. A. et al. Semitransparent small molecule organic solar cells with laminated free-standing carbon nanotube top electrodes // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2012. N 96. P. 244—250.
 48. **Hu J., Ouyang M., Yang P.** et al. Controlled growth and
- electrical properties of heterojunctions of carbon nanotubes and silicon nanowires // Nature. 1999. N 399. P. 48—51.
- 49. Lee J. U. Photovoltaic effect in ideal carbon nanotube diodes // Appl. Phys. Lett. 2005. N 87. P. 073101.
- 50. Lee J. U., Codella P. J., Pietrzykowski M. Direct probe of excitonic and continuum transitions in the photocurrent spectroscopy of individual carbon nanotube p-n diodes // Appl. Phys. Lett. 2007. N 90. P. 053103.
- 51. Lee J. U. Band-gap renormalization in carbon nanotubes: Origin of the ideal diode behavior in carbon nanotube p-n structures // Phys. Rev. B. 2007. N 75. P. 075409.
- 52. Li J. Q., Zhang Q., Chan-Park M. B. Simulation of carbon nanotube based p-n junction diodes / Carbon. 2006. N 44
- 53. Zhu H., Wei J., Wang K. et al. Applications of carbon materials in photovoltaic solar cells // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2009. N 93. P. 146–147.
- 54. Minemoto T., Takakura H., Hamakawa Y. Chemical bath deposition for the fabrication for antireflective coating of spherical silicon solar cells // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2006. N 90. P. 3576—3582.
- 55. Горин Д. А., Семенов С. В. Сферический многослойный компонент электронной схемы для нано- и микроэлектроники, Патент на изобретение № 2386191 Российской Федерации, МПК51 Н01L27/02. № 2008151880; заявл. 29.12.2008; опубл. 10.04.2009, Бюл. № 10. — 8 с.: ил. (Приор. От 29.12.2008)
- 56. Patterson J. A., Altos L. Spherical electronic components // United states patent 3,683,307. 1972.
- 57. Jia G., Steglich M., Sill I. et al. Core-shell heterojunction solar cells on silicon nanowire arrays // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2012. N 96. P. 226–230.
- 58. Oh J.-K., Lee J.-K., Han B. et al. TiO₂ rutile nanowire electrodes for dye-sensitized solar cells // Materials Letters. 2012.
- 59. Huang B.-R., Yang Y.-K., Lin T.-C. et al. A simple and lowcost technique for silicon nanowire arrays based solar cells // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2012. N 98. P. 357—362.
- 60. Chen J., Wu J., Lei W. et al. Co-sensitized quantum dot solar cell based on ZnO nanowire // Applied Surface Science. 2010. N 256. P. 7438—7441.
- 61. **Atwater H., Polman A.** Plasmonics for improved photovoltaic devices // Nature materials. 2010. V. 9. P. 205—213.
- 62. Minemoto T., Takakura H., Hamakawa Y. Chemical bath deposition for the fabrication of antireflective coating of spherical silicon solar cells // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2006. V. 90. P. 3576—3582.





УДК 621.375.8

С. Кернбах,

Институт параллельных и распределенных систем Штутгартский университет, Штутгарт, Германия E-mail: serge.kernbach@yahoo.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИКАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВЕТОДИОДНОГО И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. Ч. 2*

Поступила в редакцию 12.03.2013

Рассматривается взаимодействие между светодиодным и лазерным излучателем и детекторами на двойных электрических слоях. Эксперименты проводили в лабораторных условиях внутри здания на расстоянии 0,25...50 м между приборами, в том числе с препятствиями в виде железобетонных конструкций, в полевых условиях на расстоянии 1,65 км. Всего было проведено около 100 независимых экспериментов с более чем 700 замерами. Условия экспериментов строго контролировались для минимизации и исключения влияния таких факторов как электромагнитные поля, температурные, акустические, световые и механические воздействия. В части 2 этой работы проводится обзор и анализ полученных результатов и рассматривается гипотеза о возможном наличии высокопроникающей компоненты в излучении полупроводниковых лазеров и сверхярких светодиодов и ее применении для систем аварийной глубоководной связи.

Ключевые слова: системы подводной связи, светодионое и лазерное излучение, сенсоры на основе двойных электрических слоев, высокопроникающая компонента излучения

Введение

В части 1 этой работы были рассмотрены устройство приборов и методология экспериментов по выявлению возможной высокопроникающей компоненты светодиодного и лазерного излучения. В качестве основополагающих были использованы работы А. В. Боброва, например [5—7], которые описывали чувствительность диффузионного слоя Гуи-Чепмена [1—3] к факторам, изменяющим пространственную поляризацию диполей воды. Изменения диэлектрических характеристик системы измеряли посредством слабого постоянного тока, протекающего через глубокополяризованные электроды и воду.

В данной части этой работы будут продемонстрированы результаты проведенных экспериментов на расстоянии до 50 м в лабораторных условиях и на расстоянии в 1,65 км в полевых условиях. Будет показано, что при определенных временных условиях и параметрах генераторов: а) реакция сенсоров на удаленные генераторы практически не ухуд-

* Часть 1 данной работы опубликована в № 6, 2013.

шается при увеличении расстояния; б) наличие множественных железобетонных препятствий между ними также не влияет на качество сигнала; в) уменьшение излучательной мощности генераторов не ведет к ухудшению реакции сенсоров. Подобное поведение нехарактерно для электромагнитных, температурных, акустических или механических взаимодействий. Эти эксперименты представляют основной фокус данной работы.

Помимо описанных результатов был также обнаружен следующий интересный эффект. Как показано дальше, сенсоры и генераторы длительное время работали в паре на расстоянии до 0,5 м. За это время было проведено более 800 замеров с высокой степенью воспроизводимости результатов, опубликованных в работе [10] и в этой работе. При увеличении расстояния до 50 и 1650 м эта приемопередаточная пара демонстрировала способность передавать и принимать сигналы. Однако при долговременной разделенной работе в течение нескольких недель связь между ними постепенно прекратилась. Сходное поведение наблюдается и для генераторов, до этого не работавших с сенсорами. В исходной версии этой работы [4] мы не смогли интерпретировать факт разного поведения на коротких и длинных дистанциях и отнесли его на счет технических неполадок. Однако проводя дальнейшие эксперименты, например для дальней и сверхдальней связи [17], было замечено, что для больших расстояний необходимо специальным образом создавать синхронизацию приемника и передатчика. На коротких расстояниях в этом не было необходимости. Чтобы объяснить подобное поведение пары приемник-передатчик, выдвигается гипотеза о том, что различные механизмы ответственны за взаимодействия сенсоров и генераторов на малых и больших расстояниях. Анализируя публикации, например, в области теоретической физики [15], [16], биологии [8], [9] или прикладных систем [14], мы находим некоторое подтверждение этой гипотезе. По всей видимости, эти отличия являются одним из свойств высокопроникающей компоненты излучения, и в свою очередь, накладывают соответствующие условия на потенциальные системы связи, базирующиеся на этом принципе.

1. Проведенные измерения

Схема и методология всех экспериментов показаны в части 1 этой работы. Расстояние между геометрическим центром всех установок и стенкой металлического шкафа составляет 0,3 м. Поэтому эффективное расстояние между генератором и датчиками варьируется в пределах ±0,15 м. В силу результатов предыдущих работ [10] сначала были проведены все замеры со светодиодными генераторами. Продолжительность совместной работы двух детекторных установок (с девятью сенсорами) и двух спаренных светодиодных генераторов со-



ставляла около 6 месяцев. После этого, около одной недели экспериментов, использовали лазерный генератор. Примеры токовых кривых по методике трех лучших показаний сенсоров (см. первую часть этой работы) показаны ниже на рис. 8—10.

Контрольные измерения. В дни, предшествующие экспериментам, был проведен контрольный

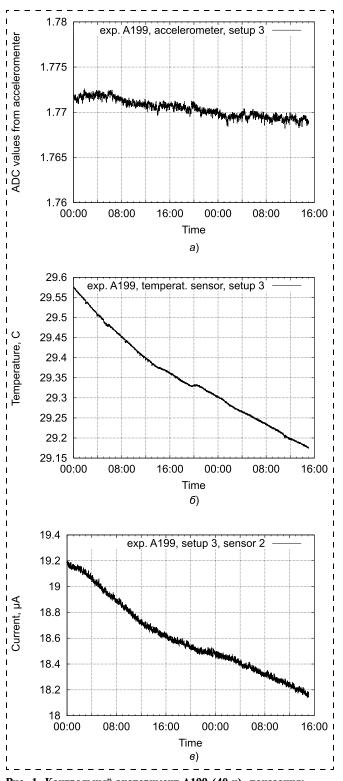


Рис. 1. Контрольный эксперимент А199 (40 ч), показания: a — акселерометра; δ — температурного сенсора; ϵ — токового сенсора в установке № 3

замер значений температуры, механических воздействий и тока через один из токовых сенсоров на протяжении 40 ч (рис. 1). В это время в здании находилось минимальное число людей (выходной день), в лабораторию с детекторами никто не входил, в соседних лабораториях не работали никакие приборы. Как видно из рис. 1, ток, проходящий че-

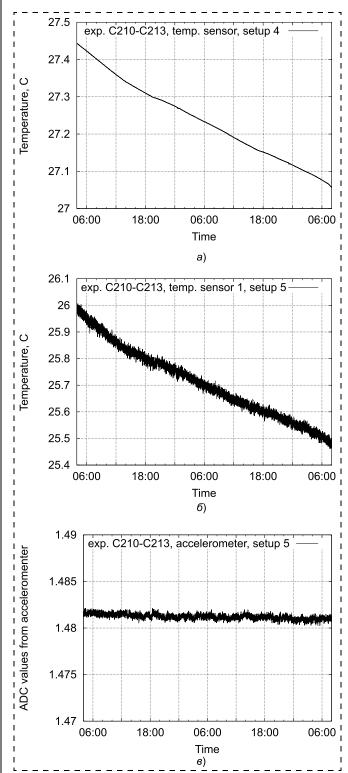


Рис. 2. Эксперименты C210—C213, показания температурных сенсоров и акселерометра установок № 4 и 5 за 52 ч. Существенных флюктуаций в показаниях температурных сенсоров и акселерометра замечено не было



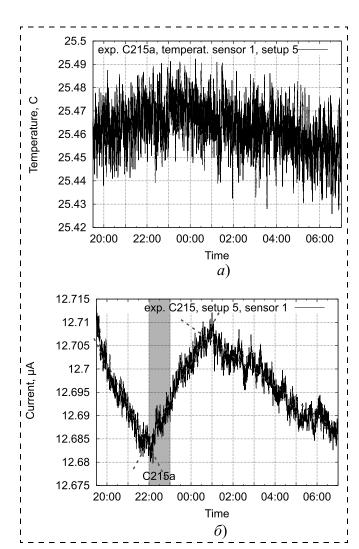


Рис. 3. Эксперимент C215а, расстояние 3,3 \pm 0,15 м через две железобетонные стены, показания:

a — температурного сенсора; b — токового сенсора установки № 5 за 11,5 ч. Существенных флюктуаций в показаниях температурных сенсоров и акселерометра замечено не было

рез сенсор, следует медленному изменению температуры без существенных флюктуаций.

Замеры на расстоянии 1...5 метров одним светодиодным генератором. Замеры были проведены в короткое время в следующие друг за другом несколько дней. Было сделано по четыре эксперимента (24 замера каждый) на расстоянии 1, 2, 3 и 5 м — эксперименты С213, С212, С210 и С218 соответственно (см. ниже таблицу). При этом использовались установки № 4, 5, каждая включает в себя три токовых сенсора.

Температурные датчики и акселерометр не зарегистрировали существенных флюктуаций или аномалий по время экспериментов С210—С213 (рис. 2). В целом мы наблюдаем увеличение числа сенсоров, имеющих реакцию на воздействие с уменьшением расстояния между генератором и светодиодами. Токовые сенсоры на расстоянии $3,3\pm0,15$ и $2,3\pm0,15$ м отреагировали на все воздействия в основном реакцией T2, т. е. изменением тренда.

На расстоянии 1,3 \pm 0,15 м мы отмечаем в основном наличие реакции T1, т. е. характерного изгиба в токовой кривой почти всех сенсоров. Сравнивая результаты на расстоянии 0,5 \pm 0,15 и 1,3 \pm 0,15 м, можно отметить большое качественное сходство в поведении — в основном тип реакции T1. Результаты на расстоянии 2,3 \pm 0,15 и 3,3 \pm 0,15 м также качественно сходны между собой — тип реакции T2.

Измерения на расстоянии 3,5, 5,5, 7,5 и 10 м через железобетонные стены. Задача этого эксперимента заключается в сравнении интенсивности взаимодействия с препятствиями (две несущих железобетонных стены толщиной в 35 см) и без препятствий. Расстояние между детекторами и светодиодными генераторами 3,5 \pm 0,15 (C215) и 5,5 \pm 0,15 м (C219) соответствует экспериментам C210 и C217. В целом не было замечено существенных отличий в показаниях сенсоров в экспериментах без и с препятствиями.

Показательным является замер С215а, показанный на рис. 3. Второй генератор был включен с 22.00 до 23.00, один из токовых сенсоров установки № 5 отреагировал изменением тренда в 22.10, т. е. тип Т2. В районе 23.00—24.00 изменился тренд температуры (речь идет об изменении в 0,01 °C за 4 ч). Поскольку за ночь не происходило никаких изменений в окружающих лабораториях, это позволило проследить долговременную динамику этого сенсора. Как видно из рис. 3, δ , токовая динамика еще раз изменила тренд в 1.00. Мы не наблюдаем плавных изменений тока и появлений характерного плавного пика, как в типе Т1. Это добавляет еще один аргумент в пользу той гипотезы. что изменения T1 и T2 являются качественно разными типами динамики токового сенсора.

Эксперименты с двумя генераторами. Цель экспериментов с двумя генераторами (рис. 4) заключалась в выяснении степени влияния второго генератора на интенсивность взаимодействия. Тестировали те условия, которые позволяли лаборатории B и C: углы между генераторами 0° и 90°, расстояния $3,3(3,5) \pm 0,15$ и $5,0(5,5) \pm 0,15$ м. Как показали эти выборочные эксперименты, заметных изменений показаний сенсоров при углах 0° и 90° не наблюдается. Наличие второго генератора несколько улучшает показания сенсоров за счет биения частот. При калибровке генератора было отмечено улучшение показаний сенсоров при наличии вторичной модуляции сигнала генератора. Возможно, что это биение создает в своем роде "третичную" модуляцию и именно этот эффект ведет к улучшению показаний. Использование лазерного генератора совместно со светодиодными генераторами также ведет к улучшению реакции сенсоров.

Эксперименты на расстоянии 15, 20 и 50 м. Расстояние в 15 м соответствует положению светодиодного генератора в конце лаборатории C; 20 м — ге-



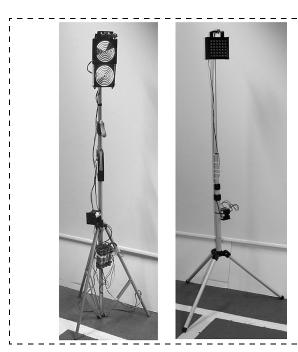


Рис. 4. Два светодиодных и лазерный генераторы, укрепленные на штативах

нератор установлен в коридоре за лабораторией C, т. е. между ними находится еще одна железобетонная стенка. Расстояние 50 м является максимально возможным расстоянием в подвале нашего здания. В этом случае между светодиодными генераторами и сенсорами находятся множественные стены, железные двери и прочие препятствия.

В этих экспериментах электроника сенсоров была доработана для уменьшения шума. Это включало перевод напряжения питания PSoC-чипа на 3,3 В, дополнительные фильтры на питание аналоговой части и установку блока фильтрующих конденсаторов на токовые электроды. В результате шум был уменьшен до уровня 10...30 нА, хотя это и наложило ограничение на максимальное значение тока через электроды. На 15 м было проведено 12 замеров с одним генератором, 36 замеров с двумя генераторами, установленными друг за другом, а не параллельно друг другу, как в предыдущих экспериментах. На расстоянии 20 м было также проведено по четыре эксперимента, во всех 36 замерах участвовали все девять сенсоров.

На расстоянии 50 м было проведено семь независимых экспериментов с 63 замерами. Интересным является эксперимент С228, который был сделан днем во время ощутимых перепадов температуры, как показано на рис. 5. Каждое изменение градиента (речь идет об изменении градиента в 0,05 °С/ч) привносит свое отклонение в динамику токового сенсора. Однако несмотря на это, изменения, вносимые включением и выключением генератора, отчетливо видны. Более того, амплитуда колебаний значительно увеличивается. Этот эф-

фект можно использовать для увеличения чувствительности сенсора.

В экспериментах на расстоянии 15, 20 и 50 м были включены только девять светодиодных полей из 16, т. е. они светили в половину мощности. Сравнивая результаты с одним и с двумя генераторами (16 полей и 9 полей), мы можем снова убедиться в том, что мощность оптического излучения не играет основной роли в наблюдаемом феномене.

Оценка диаграммы направленности светодиодного генератора. Во всех предыдущих экспериментах генератор был поднят на штативе на ту же самую высоту, что и сенсоры. В вертикальной плоскости ось излучения генератора была также направлена на сенсоры, однако точность установки колебалась около 5...7° в обе стороны. Особенно в эксперименте на расстоянии 50 м, в силу множественных поворотов в коридорах здания, погреш-

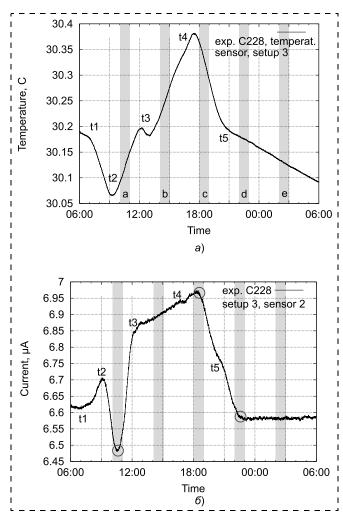


Рис. 5. Эксперимент С228, расстояние 50 м через множественные железобетонные стены, показания:

a — температурного сенсора; δ — токового сенсора установки № 3. Все изменения температуры помечены маркерами t, отмечены также соответствующие изменения в динамике тока. Видно, что сенсор реагирует не только на изменения температуры, но и на включение и выключение светодиодных генераторов (после значительного изменения амплитуды сенсор теряет на некоторое время чувствительность)

ность в ориентации генератора на сенсоры достигала ±20...25°. Для качественной оценки диаграммы направленности генераторы в той же конфигурации, как и в предыдущих опытах, были установлены на дистанции 10 м и повернуты на углы в 45, 90 и 180°. Как видно из результатов экспериментов, число откликнувшихся сенсоров уменьшается при развороте излучателя: если при 0...45° число откликов составляет 40...45 % в большом числе замеров, то при 90 и 180° — только 10...15 %. Таким образом, можно обобщить, что основной излучающей стороной является фронтовая часть внутри угла разворота ±45°. Для установления более точной диаграммы направленности используемая методика оценки результатов в силу своего только качественного характера, к сожалению, не подходит (необходимо также исследовать зависимость от расстояния). Эта качественная диаграмма направленности в какой-то мере совпадает с результатами, полученными А. В. Бобровым для своего светодиодного излучателя, — при замерах на дистанции 1 м с биологическими сенсорами, основная излучающая сторона находилась во фронтовой части в пределах \pm 22,5°, и также было фиксировано излучение задней частью прибора. Поскольку угол, на который приходится 50 % излучения применяемых светодиодов LC503FBL1-15Q-A3 составляет только 15°, то можно заключить, что оптическая и неЭМ диаграммы направленности имеют разные формы.

2. Увеличение расстояния и введение нового генератора

Полевые эксперименты со светодиодным генератором. Поскольку замеры на расстоянии 50 м все еще давали хорошее соотношение сигнала к шуму, было принято решение о проведение серии полевых экспериментов. Для этого оба генератора были перевезены на расстояние 1,65 км и установлены в подвале другого здания. Горизонтальный азимут на сенсоры выставляли с помощью карты и цифрового компаса, вертикальный азимут сохранялся посредством вычисления разницы в высоте местности. Были проведены четыре серии экспериментов: сразу после переноса генераторов на новое место (С232), через 24 ч после переноса (С236); 144 ч после переноса (С241); 552 ч после переноса (С254), всего 10 независимых экспериментов с 90 замерами. В первых экспериментах мы наблюдали реакции сенсоров на работу генераторов на уровне предыдущих экспериментов. Однако виден также эффект уменьшения такого влияния с течением времени. Если сразу после переноса генераторов реакцию показывали 45...50 % сенсоров, 144 ч спустя наблюдали реакции только порядка 30 % сенсоров, 552 ч спустя — только 15 %. Также уменьшается угол изменения тренда. Согласно выбранной методологии, эксперимент С254 считается отрицательным, т. е., принятый сигнал не является статистически значимым.

Эксперименты с генератором на лазерных диодах.

Эксперименты со светодиодными генераторами проводили раньше лазерных. К этому моменту уже были получены данные на расстоянии в 1,65 км и проведены некоторые эксперименты из работы [17] на дальних расстояниях. На основе этих работ и данных из литературы было известно об определенных сложностях в работе приемо-передающих пар. Поэтому основной задачей экспериментов с лазерным излучением было: а) установление факта его высокопроникающей способности и сравнение со светодиодным излучением; б) проведение экспериментов с "быстрой" временной динамикой, т. е., когда пара приемник-передатчик не работали долгое время вместе. Был распечатан на 3D-принтере корпус для генератора и создан еще один комплект управляющей электроники, т. е., лазерный генератор был сделан заново в течение короткого времени. Расстояние было выбрано сначала 0,5 и 5 м с железобетонными препятствиями и без них, т. е. были повторены эксперименты С205, С217, С219, но теперь с полупроводниковыми лазерами. Как показали эксперименты С247, С223 и С243а, количество и интенсивность отклика сенсоров являются сходными в этих экспериментах. Иными словами в излучении лазеров также присутствует высокопроникающая компонента и ожидаются все те же эффекты, которые были описаны для светодиодых генераторов. В дальнейшем было запланировано провести замеры на расстоянии до 5 м — для выяснения дальности связи для ранее не взаимодействующих приемо-передающих пар. Однако уже на 10 м интенсивность реакции начала существенно падать. На этой дистанции были применены различные частоты модуляции: 0 Гц (без модуляции), 10, 15, 50 Гц, 1 и 333 кГц. Как показали результаты, наиболее оптимальными частотами являются низкие частоты до 50 Гц. Дальнейшее увеличение расстояния выше 10 м в лаборатории C с лазерным генератором не проводились.

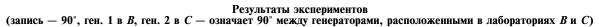
Мы собрали эксперименты С232, С236, 241, С254, С247, С223, С243 и С241 в один раздел, поскольку они указывают на временную "десинхронизацию" приемо-передающих пар — режим совместной работы компонентов коммуникационной системы в какой-то мере влияет на параметры связи. В качестве рабочей гипотезы можно сослаться на публикации [8], [9], [14] и т. д., которые предлагают введение специальных элементов в конструкцию приемо-передающих элементов, призванных стабилизировать связь при увеличении расстояний.

3. Выводы из экспериментов

В первую очередь нужно заметить, что эксперименты в данной работе проводили в тех же условиях, что и в работах [10] и [17], т. е., с тем же уровнем изоляции от ЭМ, температурных, акустических, механических помех. Особое внимание было уделено измерению ЭМ полей для рассмотрения гипотезы о неЭМ характере высокопроникающего





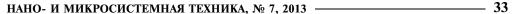


_	_		Всего	Всего	Всего	Всего	Отсутс-			
<i>d</i> ₂ , м	<i>d</i> ₁ , м	N	экспе-	сенсоров	реакции	реакции	твие	Примечания		
			риментов	concepes	T 1	T 2	реакции			
		Лабо	ораторные эі	ксперименть	со светоди	одным генер	атором			
_	0.25	C148-C157	5	30	28	0	2	В рамках работы [10]		
_	0,3	C166, C167,	4	4	3	1	0	В рамках работы [10]		
	,	A165, A168								
_	0,35	C130	1	3	2	1	0	В рамках работы [10]		
_	0.5 ± 0.15	C205, C208	2	18	11	4	3	В рамках калибровки ген.		
_	0,76	C166, C167	2	2	2	0	0	В рамках работы [10]		
_	$1,3 \pm 0,15$	C213	3	18	9	2	7	Ген. 1 в лаб. <i>В</i>		
_	$2,3 \pm 0,15$	C212	4	24	0	14	10	Ген. 1 в лаб. <i>В</i>		
	$3,3 \pm 0,15$	C210	4	24	2 0	9	13	Ген. 1 в лаб. <i>В</i>		
3.5 ± 0.15		C215	4	24		15	9	Ген. 2 в лаб. <i>С</i>		
$3,5 \pm 0,15$	3.5 ± 0.15	C216	4	24	0	15	9	90°, ген. 1 в <i>B</i> , ген. 2 в <i>C</i>		
5.0 ± 0.15	5.0 ± 0.15	C218 C217	4 4	24 24	1 1	14 16	9 7	Ген. 1 в лаб. <i>В</i> 0°, ген. 1 и 2 в лаб. <i>В</i>		
$5,0 \pm 0,15$ $5,5 \pm 0,15$	$5,0 \pm 0,15$ $5,5 \pm 0,15$	C217 C219	5	24 30	0	16 24	6	0, ген. 1 и 2 в лао. В 0°, ген. 1 и 2 в лаб. С		
7.5 ± 0.15	7.5 ± 0.15	C219 C220	4	24	0	13	11	0°, ген. 1 и 2 в лаб. С 0°, ген. 1 и 2 в лаб. С		
10.0 ± 0.15	10.0 ± 0.15	C220 C221	4	20	0	11	9	0°, ген. 1 и 2 в лаб. С		
10,0 ± 0,13	15.0 ± 0.15	C224	2	12	0	6	6	Ген. 1 в лаб. <i>С</i>		
15.0 ± 0.15	15.0 ± 0.15	C225	4	36	0	18	18	0°. ген. 1 и 2 в лаб. С		
$20,0 \pm 0,15$	20.0 ± 0.15	C226	4	36	ő	19	17	0°, ген. 1 и 2 в лаб. С		
50.0 ± 0.15	50.0 ± 0.15	C227	2	18	0	8	10	0°, ген. 1 и 2 в лаб. С		
$50,0 \pm 0,15$	$50,0 \pm 0,15$	C228	5	45	0	21	24	0°, ген. 1 и 2 в лаб. С		
Полевые эксперименты со светодиодным генератором										
1,65 км	ı _	C232	1	е рименты с 9) светодиодн О	ым тенерато 4	уром 5	Сразу после переноса		
1,65 км	_	C236	2	18	0	8	10	24 ч после переноса		
1,65 км	_	C241	4	36	ő	12	24	144 ч после переноса		
1,65 км	_	C254	3	27	0	4	23	552 ч после переноса		
	Поб	<u> </u>			<u> </u>					
$10,0 \pm 0,15$	Jiac 10,0 ± 0,15	б ораторные эк о l С231	сперименты 4	с диаграммо І 36	и направлен ()	ности свето, 15	циодного ген 21	нератора Ген. повернуты на 45°		
10,0 ± 0,13	10,0 ± 0,13	C231		50	U	13	41	по отношению к сенсорам		
$10,0 \pm 0,15$	10.0 ± 0.15	C229	2	18	0	2	16	Ген. повернуты на 90°		
10,0 = 0,13	15,0 = 0,15	(22)		10	, ,	_	10	по отношению к сенсорам		
$10,0\pm0,15$	10.0 ± 0.15	C230	3	27	0	4	23	Ген. повернуты на 180°		
								по отношению к сенсорам		
	Лабораторные эксперименты с лазерным генератором									
_	0.5 ± 0.15	C247	аоораторные 1	е эксперимеі 9	ты с лазерн 4	ым тенерато 4	рром 1	Лазер, 15 Гц, лаб. <i>В</i>		
_	5.0 ± 0.15	C223	1	9	0	4	5	Лазер, 50 Гц, лаб. <i>В</i>		
5.5 ± 0.15	3,0 = 0,13	C243a	1	9	0	4	5	Лазер, 15 Гц, лаб. <i>С</i>		
10.0 ± 0.15		C243b	1	9	ő	3	6	Лазер, 15 Гц, лаб. С		
$10,0 \pm 0,15$		C241	3	27	Õ	6	21	Лазер, 1 кГц, лаб. С		
$10,0 \pm 0,15$		C241e	1	9	0	1	8	Лазер, 333 кГц, лаб. <i>С</i>		
$10,0 \pm 0,15$		C241g	1	9	0	3	6	Лазер, 10 Гц, лаб. С		
$10,0\pm0,15$		C241f	1	9	0	2	7	Лазер, 0 Гц, лаб. <i>С</i>		
		Всего	100	701			<u> </u>			

излучения. Колебания температуры и механических воздействий указаны для всех экспериментов. На основании этих данных мы можем сделать вывод, что указанные факторы хоть и влияют на результаты экспериментов, однако не могут выступать в качестве основных факторов взаимодействия.

Результаты экспериментов собраны в таблице. Было проведено 100 независимых экспериментов с 701 замерами. В виду большого количества данных использовалась следующая полуавтоматическая методика анализа: для всех данных автоматически проводилась интерполяция методом кубических сплайнов, см. светлую кривую на рис. 6, б. Программа генерировала все графики. Анализ воздействия выполняли вручную путем сравнения данных температурного сенсора, поведения исходных данных и поведения тренда. Если колебания температуры во время одного замера не превышали 0,01 °C, отсутствовали периодические колебания и тренд показывал явно видимое изменение наклона, то на этом месте ставили метку (рис. 6, e). В периодических колебаниях обращали внимание на те фрагменты, когда период фазы приходился точно на время включения и выключения генератора. В заключение подсчитывали число меток. В дальнейшем планируется автоматизировать и этот шаг путем расчета первой и второй производной для тренда, а также проведения кросс-корреляционного анализа для нескольких трендов.

Процентное соотношение реакции Т1 и Т2 и сенсоров, не показавших реакцию в зависимости от расстояния между светодиодным генератором и детекторами, показано на рис. 7.











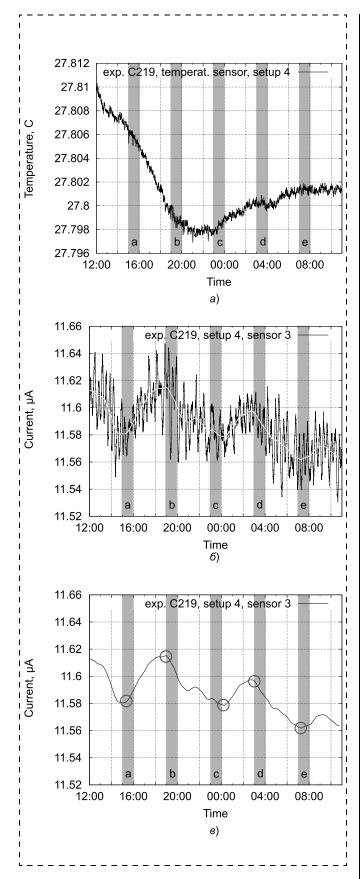


Рис. 6. Эксперимент С219, расстояние 5,5 \pm 0,15 м, включены два генератора в лаборатории C (через две железобетонные стены),

a — температурного сенсора; б — токового сенсора установки № 4 за все время эксперимента; в — анализ тренда

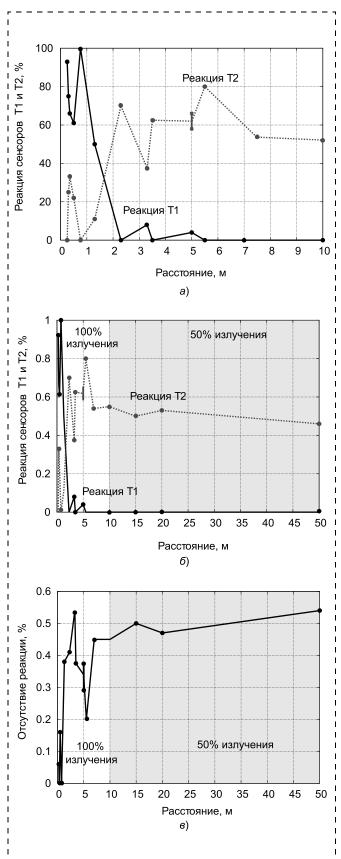


Рис. 7. Процентное соотношение в зависимости от расстояния между светодиодным генератором и детекторами:

 $a,\, \delta$ — реакции Т1 и Т2 на расстоянии до 10 и до 50 м; ε — сенсоров, не показавших реакцию. В экспериментах на расстоянии в 15, 20 и 50 м работали только восемь светодиодных полей из 16, т. е. только 50 % излучения

34











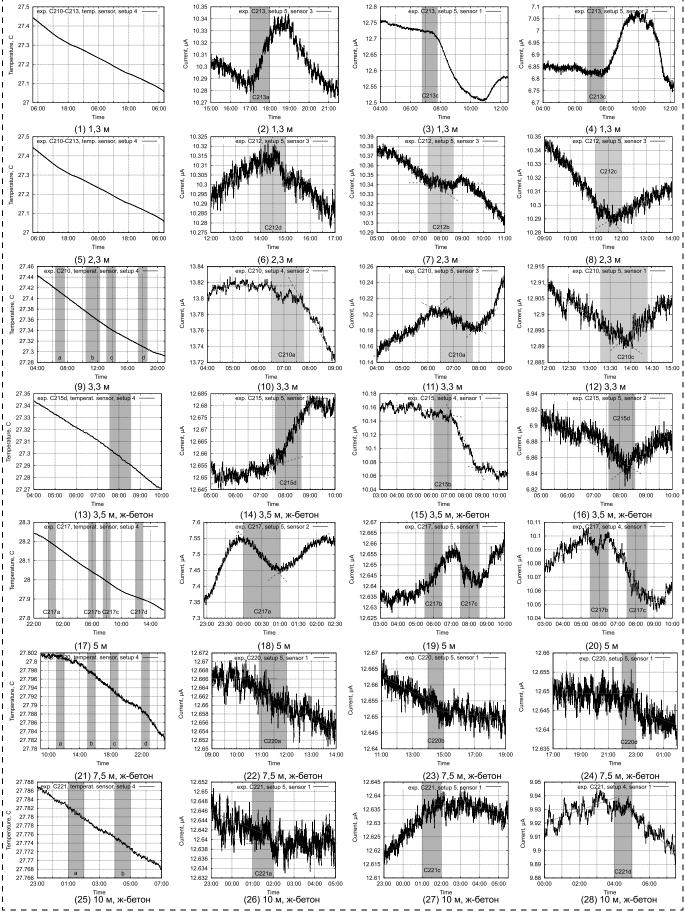


Рис. 8. Три лучших показания сенсоров в разных экспериментах при расстоянии 1,3-10 м

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 7, 2013















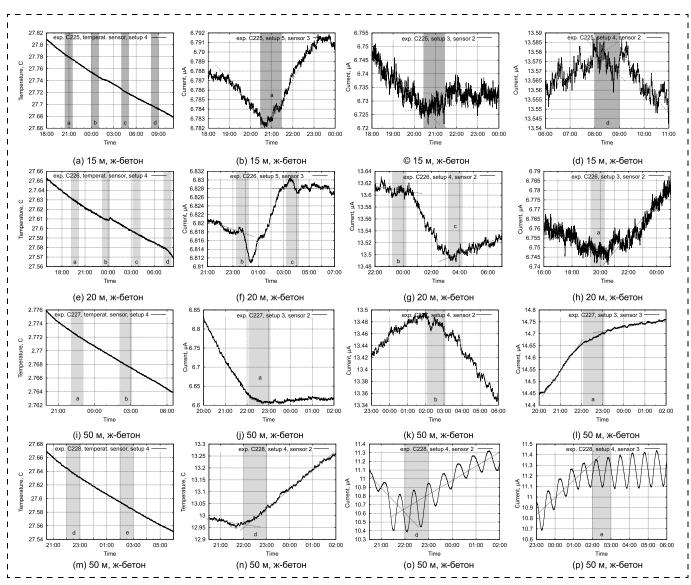


Рис. 9. Три лучших показания сенсоров в разных экспериментах при расстоянии 15, 20 и 50 м

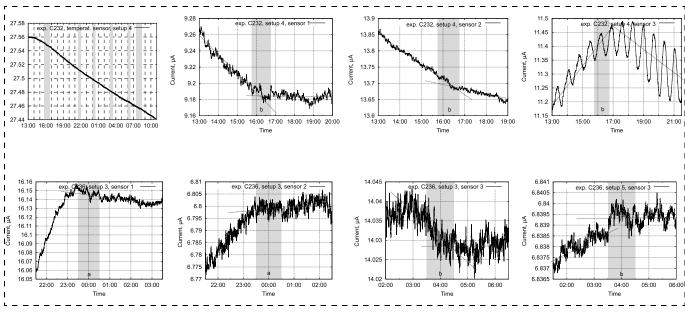


Рис. 10. Результаты некоторых замеров в экспериментах С232 и С236 на расстоянии 1,65 км между генераторами и сенсорами

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 7, 2013







36



Три лучших показания сенсоров для экспериментов на разных расстояниях показаны на рис. 8, 9 и 10.

Анализируя полученные данные, можно выделить несколько ключевых тенденций.

- 1. Сравнивая три лучших показания сенсоров на расстояниях 2,3...1650 м из рис. 8, 9 и 10, можно увидеть их сходный характер относительно амплитуд и углов наклона трендов. По всей видимости, расстояние как в 50 м, так и в 1,65 км не является предельным (если принять во внимание временную "десинхронизацию" приемо-передающих пар).
- 2. Анализируя данные всех экспериментов, мы наблюдаем некоторое ухудшение соотношения "сигнал—шум" и уменьшение угла изменения тренда с увеличением расстояния между генератором и сенсорами. Однако данные изменения не являются качественными для таких расстояний, и поскольку происходит детекция изменения тренда по принципу "да"—"нет", то максимальная чувствительность подобного двоичного сенсора зависит от способности выделить изменения тренда на фоне шума.
- 3. С увеличением расстояния преобладает тип реакции Т2. После расстояния в $2,3\pm0,15$ м мы почти не обнаруживаем реакции Т1. Точно так же и на малых расстояниях в 0,25 м мы почти не обнаруживаем реакции Т2. Мы разделили результаты лабораторных экспериментов со светодиодным генератором на две группы <1,3 и >2,3 м и провели статистический U-тест Манна—Уитни для той нуль-гипотезы, что функция распределения является одинаковой для обеих групп. На основании полученного результата z=-3,820 (для реакции Т1) и z=-3,180 (для реакции Т2) мы отвергаем нуль-гипотезу с уровнем значимости $\alpha<0,001$ и $\alpha=0,001$ соответственно.
- 4. Сравнивая результаты экспериментов без препятствий и с препятствиями (железобетонные стены), мы не можем найти качественную разницу между ними. Поскольку ЭМ поля, температурные, акустические и механические воздействия практически исключены из этих экспериментов, то такие результаты могут служить аргументом в пользу гипотезы о "высокопроникающем" характере "неЭМ компоненты" излучения светодиодного генератора. Необходимы дальнейшие эксперименты для выяснения характера и степени поглощения различных материалов.
- 5. Эксперименты из раздела 2 указывают на некоторые дальнейшие свойства "высокопроникающей компоненты" излучения, такие как временная "ресинхронизация" приемо-передающих пар при увеличении расстояния.

Анализируя результаты экспериментов этой работы, работы [10, 17] и основополагающих работ [6, 5, 7], мы отмечаем нетипичность полученных результатов относительно следующих факторов:

а) уменьшение энергии излучения (выключение 50 % светодиодов на расстоянии в 15, 20 и 50 м) не ведет к ухудшению основных показателей сенсоров для реакции Т2; б) использование препятствий в виде множественных железобетонных стен также не ведет к существенному ухудшению основных показателей сенсоров; в) увеличение расстояния с 50 до 1650 м не ведет к заметному ухудшению реакции сенсоров; г) способности "запоминать" светодиодное излучение некоторыми материалами, в частности водой [10]; г) "странная" временная динамика приемо-передающих пар, описанная в разделе 2. На основании этих экспериментальных данных, мы пока не можем отвергнуть гипотезу о "неэлектромагнитной компоненте" излучения.

Как уже указывалось в работе [10], эти эксперименты были проведены в условиях нормальной лаборатории микроэлектроники и мехатроники, т. е. не в специальной физической лаборатории. Для более тщательного исследования наблюдаемого феномена, эти работы должны быть повторены в физической лаборатории, где могут быть измерены сверхслабые сигналы различной природы. Было зафиксировано несколько случаев, когда отдельные сенсоры показывали значительные показания без видимых для этого причин. Стандартные критерии доверия к показаниям сенсоров соблюдались: одновременная регистрация несколькими (но не всеми) сенсорами, ночные часы, константные изменения температуры и т. д. Можно предположить, что используемые генераторы представляет собой не единственный источник высокопроникающего излучения.

Заключение

К сожалению, на данный момент методика оценки воздействия различных факторов на токовые сенсоры еще не полностью разработана. Отсутствует общепризнанная модель, которая позволила бы, во-первых, понять наблюдаемые эффекты, во-вторых, прогнозировать влияние тех или иных факторов. Эксперименты в этой области представляют собой пока более метод случайного поиска, чем систематический подход. Это касается в особенности "странных" пространственных или временных эффектов, которые наблюдаются в экспериментах, но которым невозможно дать однозначную оценку. Поэтому наша позиция заключается в возможно полном описании наблюдаемых феноменов, например для последующей перепроверки, без попыток дать им то или иное объяснение. Для тех, кто заинтересован в возможных гипотезах, мы ссылаемся на работы А. В. Боброва [5], Г. И. Шилова [11], С. В. Зенина [12, 13], L. Hunter и группы соавторов [15], V. Vedral [16] и других авторов.

С точки зрения микросистемотехники интерес представляет собой факт низкой потребляемой



энергии генераторов для передачи сообщений и возможность значительной миниатюризации ДЭС-сенсора. Оценивая частоту модуляции и потребляемый ток, получили, что потребляемая электрическая мощность светодиодного генератора равна около нескольких десятков милливатт. Однако данная система не оптимизирована как в плане быстродействия, так и в плане потребляемой мощности для подобных экспериментов. Например, в экспериментах [17] показано, что даже при оптической мощности одного лазерного диода в 1 мВт уже возможно добиться устойчивой передачи сообщений на больших расстояниях (при специальной конструкции генератора). Таким образом, здесь существует определенный потенциал, который может быть развит дальше как в плане возможных расстояний и емкости канала связи, так и плане микросхемотехники, например для систем аварийной связи [14] глубоководных АНПА.

Для будущих работ, в особенности для дальнейшего изучения этого феномена, представляется возможным, что сочетание разнообразных технических и биологических сенсоров, например [18— 21] позволит сделать экспериментальную базу более точной и перевести результаты из качественных в количественные.

Автор хотел бы высказать признательность за ценные советы в процессе подготовки и анализа экспериментов, а также понимания общей природы наблюдаемого феномена А. В. Боброву, С. А. Васильеву, В. Т. Шкатову, Ю. П. Кравченко, В. А. Жигалову и А. Савсуненко.

Список литературы

- 1. **Stenschke H.** Polarization of water in the metal/electrolyte interface // Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry. 1985. 196 (2). P. 261—274.
- 2. **Gruen D. W. R., Marcelja S.** Spatially varying polarization in water. A model for the electric double layer and the hydration force / J. Chem. Soc, Faraday Trans. 1983. V. 2, N 79. P. 225—242.
- 3. **Belaya M. L., Feigelman M. V., Levadnyii V. G.** Structural forces as a result of nonlocal water polarizability // Langmuir. 1987. N 3 (5). P. 648—654.

- 4. **Kernbach S.** On High-Penetrating LEDs Emission on Short and Middle Ranges // Proc. of the Int. Conf. Torsion fields and Information Interactions. Moscow. 2012. P. 98—114.
- 5. **Бобров А. В.** Модельное исследование полевой концепции механизма сознания (A. V. Bobrov. Investigating a field concept of consciousness). Орел: Изд. ОрелГТУ, 2006.
- 6. **Бобров А. В.** Взаимодействие спиновых полей материальных объектов (А. V. Bobrov, Interaction between spin fields of material objects) // Материалы Международной научной конференции. Хоста, Сочи, 25—29 августа. 2009. Р. 76—86.
- 7. **Бобров А. В.** Реакция двойных электрических слоев на воздействие торсионного поля (V. Bobrov, Reaction of double electrical layer on torsion field). ВИНИТИ N 1055-B97, 1997.
- 8. **Маслоброд С. Н.** Эффект дальней связи между прорастающими семенами, возникающий при их контакте в период набухания // Электронная обработка материалов. 2012. № 48 (6). Р. 99—113.
- 9. **Maslobrod S. N.** The Distant Effect of Water on Seeds Outside a Closed Reservoir // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2011. N 47 (4). P. 378—383.
- 10. **Kernbach S.** Replication Attempt: Measuring Water Conductivity with Polarized Electrodes // Journal of Scientific Exploration. 2013. N 27 (1). P. 69—105.
- 11. **Шипов Г. И.** Теория физического вакуума. М.: HT-центр, 1993.
- 12. **Зенин С. В.** Структурированное состояние воды как основа управления поведением и безопасностью живых систем. М.: РГБ, 2005.
- 13. Зенин С. В. Научные основы и прикладные проблемы энергоинформационных взаимодействий в природе и обществе. М.: ВИУ, 2000.
- 14. Замша В. В., Шкатов В. Т. О возможном способе сверхдальней передачи аварийного сигнала в экстремальных и чрезвычайных ситуациях // Сборник УГАТУ. Безопасность, 2012. Р. 128.
- 15. **Hunter L., Gordon J., Peck S., Ang D., Lin J.-F.** Using the Earth as a Polarized Electron Source to Search for Long-Range Spin-Spin Interactions // Science. 2013. N 339 (6122). P. 928—932.
- 16. **Vedral V.** Quantifying entanglement in macroscopic systems // Nature. 2008. N 453 (7198). P. 1004—1007.
- 17. **Кернбах С., Замша В., Кравченко Ю.** Дальние и сверхдальные приборные взаимодействия // Журнал формирующихся направлений науки. 2013. № 1 (1). С. 24—42.
- 18. **Mabeck J., Malliaras G.** Chemical and biological sensors based on organic thin-film transistors // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2006. N 384. P. 343—353.
- 19. **Nylander C.** Chemical and biological sensors // Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1985. N 18 (9). P. 736.
- 20. Macaya D. J., Nikolou M., Takamatsu S., Mabeck J. T., Owens M., Malliaras G. G. Simple glucose sensors with micromolar sensitivity based on organic electrochemical transistors // Sensors and Actuators B: Chemical. 2007. N 123 (1). P. 374—378.
- 21. **Мигунов С. А., Сидоров Е. П., Творогова А. В.** Рефлексогенный механизм действия спектрального облучателя СПЕКТО-Р на иммобилизированные ферментные системы // Рефлексотерапия. 2006. № 1 (1). С. 14—17.





А. С. Батурин, канд. физ.-мат. наук, доц.,

e-mail: baturin@mail.mipt.ru, **М. В. Спиридонов**, науч. сотр.,

e-mail: spiridonob@yandex.ru,

Д. В. Негров, аспирант, науч. сотр., e-mail: dmitriynegrov@gmail.com,

Кузин А. А., аспирант, науч. сотр.,

Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный,

Россия

СОСРЕДОТОЧЕННЫЙ ВЫХОДНОЙ РЕЗОНАТОР МИКРОКЛИСТРОНА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Поступила в редакцию 13.11.2012

Предложена структура сосредоточенного резонатора, работающего в миллиметровой области длин волн, пригодного для использования в качестве выходного резонатора клистрона. Приведены данные моделирования такой структуры и предложен подход к ее формированию.

Ключевые слова: усилитель, миллиметровое излучение, резонатор, клистрон, метод конечных разностей во временной области

Введение

Использование электромагнитного излучения с длинами волн в диапазоне 1 мм и менее (миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны) представляется интересным для ряда современных задач электроники. В частности, построение систем связи с частотой несущей в диапазоне 200...300 ГГц, где находится окно прозрачности атмосферы, позволило бы повысить скорость передачи данных до уровней свыше 10 Гбит/с [1]. Такие скорости востребованы не только в системах дальней связи, для которых нужны передатчики высокой мощности, но и при построении локальных беспроводных сетей, например, для передачи видеосигнала к устройствам отображения в пределах дома или офиса [2]. Для передачи видеосигнала сверхвысокой четкости представляется перспективным использование безлицензионного диапазона 190 ГГц. При этом ослабление сигнала на уровне 10 дБ/км, которое возникает из-за наличия линий поглощения воды в данной области спектра, не будет критичным ввиду небольшого радиуса действия таких сетей. Электромагнитное излучение миллиметрового диапазона также может использоваться в системах безопасности [3] и в медицине [4].

Основными источниками, работающими в тетрагерцовом диапазоне, являются оптические смесители [5], генераторы на спонтанном параметрическом рассеянии [6], лампы обратной волны и генераторы на транзисторах с высокой электронной

подвижностью (в длинноволновой части этого диапазона). Такие устройства, как правило, имеют значительные габаритные размеры и зачастую требуют низкотемпературного охлаждения функциональных элементов. И хотя некоторые из таких устройств позволяют достичь высоких мощностей в импульсе [7], их размер и высокая стоимость не всегда оправданы. Для локальных вычислительных сетей представляют интерес именно маломощные, миниатюрные и дешевые источники миллиметрового диапазона.

Подход к реализации

Одним из перспективных подходов к реализации таких источников является использование принципов вакуумных источников СВЧ излучения, таких как клистроны, лампы бегущей волны (ЛБВ), лампы обратной волны (ЛОВ) и т. д. Например, в работах [8, 9] рассматриваются подходы к созданию таких устройств, где электромагнитная структура (ЭМ-структура) формируется с помощью рентгеновского LIGA-процесса. Рабочая длина волны источника накладывает ограничения на минимальный размер и аспектные соотношения ЭМ-структур и приводит к тому, что LIGA-процесс — фактически единственный, пригодный для их формирования. К сожалению, время работы синхротронных степперов и рентгеновские шаблоны крайне дороги, и массовое производство таким способом сильно затруднено. В качестве альтернативы LIGA-процессу рассматривается также использование плазмохимических ASE (Advanced Silicon Etching) процессов, в частности, bosch-процесса или криогенного травления [10]. Однако bosch-процесс не позволяет достигать высоких скоростей травления, а получаемые вертикальные стенки имеют достаточно высокую шероховатость, что приводит к росту резистивных потерь. Криогенное травление также имеет ограниченную применимость из-за значительного расхода жидкого азота и сложностей с охлаждением пластины.

Таким образом, представляют интерес ЭМструктуры миллиметрового диапазона, получаемые традиционными методами литографии. Такой способ изготовления накладывает ограничение на уровне менее 1 мкм на достижимый вертикальный размер структур, что не позволяет напрямую изготавливать миниатюризированные (масштабированные) аналоги вакуумных клистронов, ЛОВ и ЛБВ. Целью данной работы является демонстрация возможности создания ЭМ-структур для клистрона, использующего сосредоточенные резонансные структуры (в частности, сосредоточенный LCрезонатор), которые могут быть изготовлены методами классической литографии. Для обеспечения взаимодействия электронного пучка с электромагнитным полем в резонансной структуре используется элемент в виде двух близко расположенных

мостов, охватывающих электронный пучок по внешнему контуру. Данные мосты являются обкладками конденсатора в резонансной LC-структуре. Нижний предел на размер области взаимодействия обусловлен только диаметром пучка и требуемой емкостью. Для устройств миллиметрового диапазона этот размер лежит в области, доступной для проекционной УФ литографии. Дополнительным преимуществом является то, что мощность от резонатора отводится планарной передающей линией, что в ряде случаев удобнее. Из недостатков такой структуры можно отметить увеличенные резистивные потери и радиационные потери из-за открытости резонансной структуры. При этом первыми в маломощных источниках можно пренебречь, а вторые несущественны вследствие того, что размер всей резонансной структуры много меньше длины волны.

Другой проблемой является специфичность требований к подложке, на которой формируются ЭМ-структуры. Диэлектрические потери в подложке снижают добротность резонаторов, а в случае подложек с большой диэлектрической проницаемостью возникают также трудности с увеличением радиационных потереть вследствие уменьшения длины волны вблизи поверхности подложки. Для подавления этих эффектов предлагается располагать структуры на тонких диэлектрических мембранах (толщина от 100 нм до 5 мкм). Технологически такие мембраны могут быть сформированы путем плазмохимического осаждения диэлектрического слоя на кремниевую подложку с последующим травлением с обратной стороны подложки, что является достаточно дешевой операцией, требующей только низкоразрешающей литографии и стандартного щелочного жидкостного травления.

Общий вид предлагаемой ЭМ-структуры представлен на рис. 1. Она состоит из следующих компонентов: область взаимодействия, образованная парой "мостов", соединяющая их высокоиндуктивная линия и две фидерные линии. По своей конструкции ЭМ-структура частично напоминает два параллельно соединенных сплит-ринг резонатора [11]. Так как фактически вся емкость резонатора сосредоточена в области между мостами, то увеличивается коэффициент связи с пучком. Также благодаря высокой степени однородности поля в зазоре уменьшается степень расфокусировки пучка при прохождении сквозь структуру.

Следует отметить, что в реальном клистроне такой резонатор будет заряжаться за счет перехвата части тока пучка. Это приведет к тому, что спустя некоторое время после запуска энергия подлетающего пучка будет значительно уменьшаться за счет действия электростатического поля, что приведет к потере усиления. Эта проблема может быть решена двумя путями. Первое решение — добавление ме-

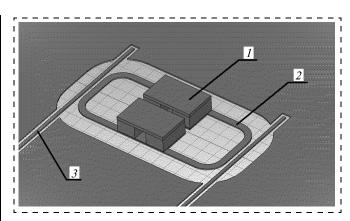


Рис. 1. Общий вид топологии выходного резонатора: 1 — область взаимодействия, 2 — индуктивность, 3 — фидерные линии

жду резонатором и шиной заземления высокоимпедансной активной нагрузки, такой что создаваемое ей снижение добротности не заметно на фоне остальных механизмов потерь. Второе решение, требующее большей площади на кристалле, заключается в соединении резонатора и шины заземления посредством четвертьволновой линии, что соответствует заземлению по постоянному току и эффективному разрыву на рабочей частоте.

Расчет

Для расчета точной геометрии структуры использовался следующий подход: после предварительной оценки требуемых размеров структура рассчитывалась методом конечных разностей во временной области. При этом в начальный момент времени между обкладками конденсатора моделировался широкополосный импульс тока, что приводило к возникновению осцилляций. Затем рассчитывался процесс релаксации до тех пор, пока полная энергия всей системы не опускалась до уровня —80 дБ от начальной. Сравнение расчетов с разными уровнями окончания показали, что остановка по такому уровню энергии достаточна для получения требуемой точности на уровне ±2,5 дБ вплоть до 500 ГГц.

По расчетным данным вычислялась зависимость напряженности электрического поля на оси конденсатора от времени, после чего проводилось дискретное Фурье-преобразование и рассчитывалось его отношение к дискретному Фурье-преобразованию возбуждающего импульса. Резонансная частота соответствует максимуму этой характеристики, а добротность вычислялась по —3 дБ полосе.

Использование в работе FDTD (finite difference time domain, метод конечных разностей во временной области) вместо поиска собственных значений и расчета добротности методом возмущения обу-

словлены тем, что система имеет достаточно много паразитных мод, которые не возбуждаются в реальности, но избежать их появления при решении задачи поиска собственных значений затруднительно. Значительное число паразитных мод сильно затрудняет поиск рабочей моды и параметрическую оптимизацию. Существование большинства этих мод связано с радиационными потерями. Ограничение области решения приводит к тому, что энергия, которая должна уходить из области решения, отражается назад и возникает множество нефизических стоячих волн. Применение FDTD позволяет использовать на границах вычислительной области идеально согласованные слои [12], эффективно подавляющие такое отражение. Также появляется возможность оценки радиационных потерь путем интегрирования вектора Пойнтинга по поверхности граничного слоя.

На рис. 2 представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), полученные описанным выше способом. Полная добротность для ненагруженного состояния, связанная исключительно с резистивными и радиационными потерями Q_r равна 450. Полная добротность нагруженного состоя-

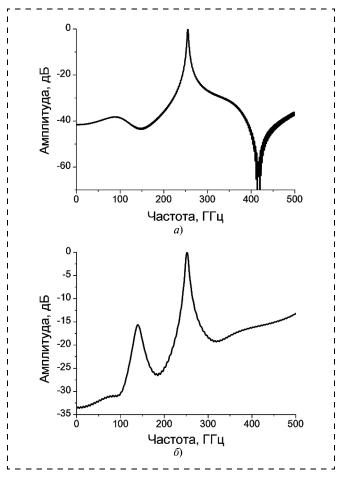


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики резонатора: a — ненагруженное состояние; δ — резонатор с подключенной нагрузкой

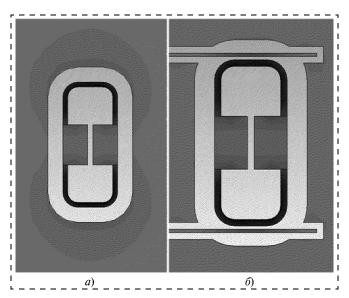


Рис. 3. Распределение тока в резонаторе: a — изолированный резонатор; δ — резонатор с нагрузкой

ния Q равна 40 для нагруженного. Отсюда внешняя добротность

$$Q_{ext} = \frac{QQ_r}{Q_r - Q} = 44.$$

Для минимизации резистивных потерь повороты индуктивной линии, на которых ток сосредоточен у внутренней части, были скруглены. Такое скругление приводит к уменьшению индуктивности, и для его компенсации необходимо увеличивать длину всей линии, что, однако, увеличивает радиационные потери. Таким образом, существует некий оптимальный радиус закругления, при котором достигается минимум полных потерь. На рис. 3 показано распределение тока в конструкции с углами, имеющими оптимальный радиус закругления. Можно видеть, что достигнуто практически равномерное распределение тока по всей ширине проводника.

Степень взаимодействия электронного пучка и резонатора будет определяться отношением скорости движения пучка и частоты осцилляции поля. Если времена пролета пучка и период осцилляции поля становятся сравнимыми, поле в зазоре резонатора будет изменяться во время движения пучка в нем. Параметр, характеризующий связь электронного пучка и электромагнитного поля в резонаторе, можно представить в виде

$$M = \frac{\sum_{\substack{x_{\text{min}} \\ x_{\text{min}} \\ x_{\text{max}} \\ x_{\text{max}} \\ x_{\text{max}} \\ x_{\text{max}}} i \frac{\partial}{\partial z} z dx$$

где E(z) — амплитуда напряженности поля; ω — частота поля; u — скорость движения электронов.

Таким образом, для нерелятивистских пучков становится важным выбор оптимальной энергии электронного пучка, при которой достигается максимум M. На рис. 4, a показано распределение поля на оси пучка в рассматриваемой структуре. Можно видеть, что кроме основного поля в зазоре существует еще небольшое поле на внешних краях структуры. Фактически это приводит к тому, что значение M может превысить единицу (пучок будет "видеть" разность потенциалов, большую, чем амплитуда напряжения в резонаторе). На рис. 4, δ изображена зависимость M от энергии пучка. Видно, что оптимальная энергия пучка в нашем случае лежит около 400 эВ.

На рис. 5 показана зависимость напряжения на фидерной линии от времени, полученная в результате particle-in-cell-расчета выходного резонатора. Ток пучка при этом был равен 250 мкА при энергии 400 эВ. Амплитуда колебания напряжения составляет 0,35 В. Волновой импеданс фидерной линии равен 60 Ом. Таким образом, мощность, отводимая одной фидерной линией, примерно равна 1 мВт, а полная отводимая мощность 2 мВт. Мощность электронного пучка составляет 100 мВт. Та-

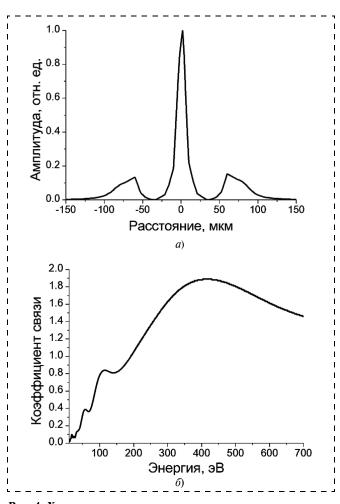


Рис. 4. Характер поля в пролетном промежутке: a — распределение поля на оси пучка; δ — зависимость коэффициента связи пучка в пренебрежении объемным зарядом

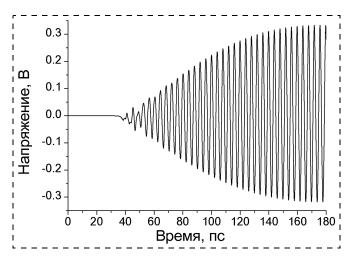


Рис. 5. Напряжение на одной из двух фидерных линий во время процесса запуска клистрона

ким образом, электронная эффективность выходного резонатора составляет 2 %.

Для изготовления такой структуры предлагается техпроцесс, основанный на последовательном выполнении процессов магнетронного напыления затравочного металлического слоя, фотолитографии по слою резиста определенной толщины и электроосаждении меди в форму из фоторезиста. После формирования всех необходимых медных слоев осуществляются жидкостное удаление фоторезиста и жидкостное травление затравочного слоя. Формирование описываемой такой структуры требует всего трех этапов литографии и набора достаточно простых жидкостных процессов. Дополнительным преимуществом такого подхода является то, что кроме резонансных структур этот процесс позволяет сформировать также копланарные линии передачи и структуры, необходимые для их работы, в частности, "мосты" для подавления нечетных мод.

После формирования структур задняя сторона пластины протравливается до предварительно осажденного тонкого диэлектрического слоя (например, нитрида кремния) для образования мембраны. При этом мембрана будет дополнительно усилена за счет нижнего слоя металла, занимающего почти всю площадь подложки. Сечение слоев устройства показана на рис. 6.

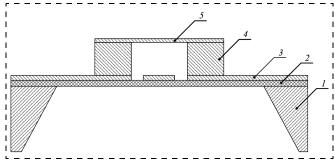


Рис. 6. Схема слоев устройства (не в масштабе): 1 — подложка; 2 — нитрид кремния; 3 — первый слой; 4 — переходной слой; 5 — второй слой



Заключение

Показана возможность исполнения выходного резонатора клистрона в виде сосредоточенной открытой структуры. Несмотря на то, что такая структура имеет конечную излучательную добротность, ее малость относительно длины волны приводит к тому, что радиационные потери малы по сравнению с резистивными. При этом полная добротность имеет достаточно большое значение для того, чтобы потери на низких мощностях были не критичны. Кроме устройств клистронного типа такой техпроцесс позволяет также создавать замедляющие структуры для ламп бегущей волны или ламп обратной волны.

Данная работа была выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования $M\Phi T U$ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Φ eдерации ($\Gamma K N = 14.740.11.0027$, $\Gamma K N = 16.552.11.7022$).

Список литературы

- 1. **Wells J.** Multi-Gigabit Microwave and Millimeter-Wave Wireless Communications. Artcch House Publishers. USA, Norwood. 2010. 230 p.
- 2. **Pepe P., Zito D.** 60-GHz transceivers for wireless HD uncompressed video communication in nano-era CMOS technology // 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Malta. Valletta. 26—28 Apr. 2010. P. 1237—1240.

- 3. **Sheen D. M., Douglas L. M., Thomas E. H.** Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001. V. 49, N 9. P. 1581—1592.
- 4. **Siegel P. H.** Terahertz technology in biology and medicine // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004. V. 52, N 10. P. 2438—2447.
- 5. Matsuura S., Tani M., Sakai K. Generation of coherent terahertz radiation by photomixing in dipole photoconductive antennas // Applied Physics Letters. 1997. V. 70, N 5. P. 559—561. 6. Howell J. C., Bennink R. S., Bentlev S. J., Bovd R. W.
- 6. Howell J. C., Bennink R. S., Bentlev S. J., Bovd R. W. Realization of the Einstein-Podolsky-Rosen paradox using momentum-and position-entangled photons from spontaneous parametre down conversion // Physical Review Letters. 2004. V. 92, N 21. P. 210403.
- 7. **Shi W., Ding Y. J.** A monochromatic and high-power terahertz source tunable in the ranges of 2,7-38,4 and 58,2-3540 μm for variety of potential applications // Applied Physics Letters. 2004. V. 84, N 10. P. 1635–1637.
- 8. **Garcia-Garcia J., Martin F., Miles R. E.** Optimization of micromachined reflex klystrons for operation at terahertz frequencies // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2004. V. 52. N 10. P. 2366—2370.
- Techniques. 2004. V. 52, N 10. P. 2366—2370.

 9. **Booske J. H., Lee W. J., Gallagher S., Van Der Weide D., Limbach S., Jain K., Kory C. L.** Microfabricated TWTs as high power, wideband sources of THz radiation // Proc. of the 9th International Conference. on Terahertz Electronics. USA. Charlottesville. VA. 15—16 Oct 2001.

 10. **Walker M. J.** Comparison of Bosch and cryogenic
- 10. **Walker M. J.** Comparison of Bosch and cryogenic processes for patterning high aspect ratio features in silicon // Proc. SPIE. 2001. V. 4407. P. 89.
- 11. Penciu R. S., Aydin K., Kafesaki M., Koschny T., Ozbay E., Economou E. N., Soukoulis C. M. Multi-gap individual and coupled split-ring resonator structures // Optics express. 2008. V. 16, N 22. P. 18131—18144.
- 12. **Akleman F., Sevgi L.** A novel implementation of Berenger's PML for FPTP applications // Microwave and Guided Wave Letters. 1998. V. 8, N 10. P. 324—326.

УДК 621.382.049.77

В. В. Платонов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

С. С. Генералов, науч. сотр.,

e-mail: generalserg89@mail.ru,

М. И. Смехова, техник 1-й категории,

В. В. Амеличев, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

С. А. Поломошнов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ООО "НПП "Технология"

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ МЭМС-КЛЮЧ НА СТРУКТУРЕ КРЕМНИЙ—СТЕКЛО

Поступила в редакцию 27.11.2012

Рассмотрены основные преимущества МЭМС-переключателей. Приведены результаты реализации конструкции кремний—стекло с балочным креплением подвижных электродов, не имеющей в технологии изготовления операцию удаления жертвенного слоя. Представлены основные результаты исследования разработанных МЭМСключей.

Ключевые слова: МЭМС-переключатель, электростатический актюатор, рабочее напряжение, металлизация из алюминия

В современных приборах автоматического управления в качестве устройств ввода-вывода используется большое число электромеханических реле. Обычные реле имеют относительно большой размер и фактически могут занимать до 80 % места на печатных платах. Кроме того, для коммутации каждого из таких реле требуется мощность управления до 150...200 мВт. Вследствие этого изделие с большим числом реле становится существенно энергоемким и имеет большие габаритные размеры.

Одним из вариантов решения проблемы является микрореле, исполненное по технологии МЭМС. Большая часть исследований создания микромеханического реле фокусировалась на коммутации маломощных высокочастотных сигналов в радиоэлектронной аппаратуре. В настоящее время актуальным является вопрос обеспечения коммутации постоянного тока средних мощностей, например, в устройствах управления аэрокосмической техники, беспилотных летательных аппаратов, автоматических станций мониторинга окружающей среды, удаленных объектов природного и промышленного характера. В этих устройствах

требуются малогабаритные коммутаторы, потребляющие низкую мощность.

По сравнению с полупроводниковыми устройствами, например транзисторами, реле имеют преимущество в высоком сопротивлении в разомкнутом состоянии. Оно обусловлено гальванической изоляцией, которая обеспечивается воздушным промежутком между электрическими контактами реле. Поэтому даже при больших напряжениях обеспечивается практически идеальная изоляция.

В настоящее время переключатели с электростатическим управлением наиболее распространены среди МЭМС-переключателей, разрабатываемых в целях применения в управляющих устройствах. Электростатический актюатор, через который осуществляется включение и выключение переключателя, состоит из двух электрически изолированных электродов, один из которых расположен на неподвижном основании, а другой на упругом элементе переключателя. При подаче разности потенциалов на электроды между ними возникают силы электростатического притяжения, в результате действия которых упругий элемент притягивается к основанию, замыкая шунтом токопроводящие линии.

Преимущества электростатического актюатора перед электромеханическим состоят в крайне малой потребляемой мощности (ток потребляется только при переключении, а типовое значение потребляемой мощности на один цикл переключения лежит в пределах 0,1...0,2 нВт), простоте изготовления и относительно малым временем переключения (10...100 мкс) [1].

Конструктивно электростатические МЭМС-переключатели могут быть выполнены в разных вариантах. Они могут быть консольными, балочными, торсионными, гребенчатыми. Технологически их можно исполнить на основе металлов, кремния, поликремния, органических пленок.

Анализ современного рынка электростатических МЭМС-переключателей показывает, что существует большое число СВЧ МЭМС-переключателей, коммутирующих малые мощности и практически полностью отсутствуют переключатели с возможностью коммутации токов более 1 А.

Так, например, в Научном центре Рокуэлл (Rockwell Science Center) были разработаны балочные МЭМС-переключатели с многосекционным упругим элементом [2]. В качестве структурного слоя в них использовался низкотемпературный оксид кремния (SiO₂), нанесенный на полиимид, используемый в качестве жертвенного слоя. Переключатель формировался на подложке из GaAs для обеспечения низких диэлектрических потерь. Слой низкотемпературного SiO₂ формировался с помощью специального процесса осаждения, обеспечивающего низкий уровень механических напряжений. Контакты, электроды и металлиза-

ция переключателя выполнялись из золота с помощью взрывной фотолитографии. Удаление жертвенного слоя проводилось с помощью сухого травления в кислородной плазме. Данные переключатели имели сопротивление двух параллельных контактов 0,5 Ом. Типовое управляющее напряжение переключателя составляло 40...60 В.

В Массачусетском технологическом институте (Massachusetts Institute of Technology) было разработано микрореле по МЭМС-технологии, в конструкции которого был положен принцип бистабильности [3]. В основе технологии изготовления этого микропереключателя лежал процесс глубокого реактивно-ионного травления кремния с последующим нанесением металлизации методом напыления и гальваностегии. Испытания лабораторных образцов показали, что при управляющем напряжении 60...80 В допустимая нагрузка контактов составила порядка 2 А.

Фирмой OMRON Corporation [4] был разработан микропереключатель, реализованный на основе процесса соединения кремниевой пластины со стеклянной подложкой. Соединение кремниевой пластины с подвижными электродами со стеклянной подложкой, на которой расположены неподвижные электроды и сигнальная линия, проводилось методом анодной сварки. Размер сборки кремний—стекло составил 2 × 3 мм. При управляющем напряжении 24 В максимально допустимый ток составил 150 мА.

Целью настоящей работы является создание МЭМС-ключа способного коммутировать постоянные токи более 1 A.

При реализации конструкции кремний—стекло с балочным креплением подвижных электродов, не имеющей в технологии изготовления операцию удаления жертвенного слоя, наблюдается почти полное отсутствие изгибающих напряжений, возникающих в процессе изготовления, что позволяет достаточно точно контролировать зазоры между конструктивными элементами устройства. Кроме того, все упругие элементы выполнены из монокристаллического кремния, что повышает их механические свойства.

Рассмотренная в данной работе конструкция состоит из двух кристаллов: кремниевого, содержащего подвижную часть конструкции, и стеклянного, на котором расположены силовые шины и контактная разводка МЭМС-ключа. Технология изготовления такого ключа состоит из трех этапов: изготовление кремниевого кристалла, изготовление стеклянного кристалла и соединение этих двух кристаллов в единый элемент.

Технология изготовления кремниевого кристалла МЭМС-ключа совместима с технологией изготовления интегральных схем на основе комплементарных МОП (КМОП ИС) с топологическими размерами 3 мкм.

В качестве исходного материала для создания кремниевого кристалла МЭМС-ключа использовались подложки монокристаллического электронного кремния типа КЭФ-4,5 (100) с двусторонней полировкой.

После химической обработки в растворе Каро, перекисно-аммиачном растворе (ПАР) и деионизованной воде пластины окислялись до толщины ${\rm SiO}_2$, равной 0,65 мкм, во влажном кислороде при температуре $1000~{\rm ^{\circ}C}$, осаждался слой нитрида кремния ${\rm Si}_3{\rm N}_4$ до толщины 0,17 \pm 0,01 мкм при температуре $800~{\rm ^{\circ}C}$ методом осаждения из парогазовой фазы. Затем проводился первый цикл фотолитографии, в котором рисунок мембран переносился в слой ${\rm Si}_3{\rm N}_4$ в процессе плазмохимического травления (ПХТ). Таким образом, создавалась химически стойкая маска для последующего анизотропного травления кремния в растворе щелочи.

Следующей операцией проводилось анизотропное травление кремния в растворе 33 % КОН для формирования мембран толщиной 25 \pm 5 мкм. После использования маски из $\mathrm{Si}_3\mathrm{N}_4$ она полностью удалялась вместе с подслоем из SiO_2 до чистой поверхности кремния.

При проведении второго цикла технологической операции фотолитографии рисунок на лицевой стороне совмещался благодаря ранее сформированным меткам с рисунком на обратной стороне. Далее под маской фоторезиста проводилось плазмохимическое травление кремния на глубину 5 мкм (рис. 1).

После этого фоторезистивная маска удалялась в кипящем растворе Каро, затем пластины подвергались химической обработке последовательно в чистом растворе Каро и ПАР. Затем проводилась диффузия фосфора при температуре 950 °С для получения значений поверхностного сопротивления слоя в диапазоне 5...7 Ом/□. Легирование выполнялось для улучшения электрических характеристик кремниевой мембраны и, впоследствии, подвижного электрода. Затем пластины окислялись до толщины SiO₂, равной 0,3 мкм, во влажном кислороде при температуре 1000 °С (рис. 2).

При проведении третьего цикла фотолитографии формировались островки оксида на лицевой стороне мембраны, и далее пластина вновь подвергалась окислению толщиной SiO₂, равной 0,3 мкм



Рис. 1. Мембрана после плазмохимического травления кремния на глубину 5 мкм

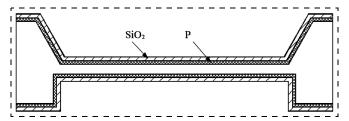


Рис. 2. Диффузия фосфора и окисление до толщины 0,3 мкм

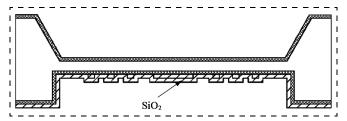


Рис. 3. Создание электрической изоляции для контакта

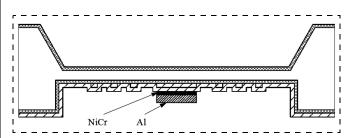


Рис. 4. Создание металлического контакта

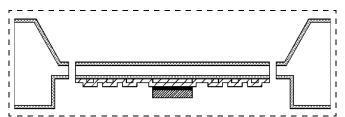


Рис. 5. Формирование сквозных отверстий с помощью глубокого анизотропного травления для создания подвижных микроэлементов

(рис. 3). Данные островки образовывали массив небольших выступов на гладкой стороне мембраны и, в дальнейшем, препятствовали слипанию электродов.

Далее методом магнетронного распыления наносились слои NiCr толщиной 0,05 мкм и алюминия Al толщиной 1,2 мкм, и в четвертом цикле фотолитографии формировалась область металлизации для шунта (рис. 4). В пятом цикле фотолитографии удалялись все диэлектрические пленки, исключая рабочие области на лицевой стороне мембран.

В шестом цикле фотолитографии формировалась маска для глубокого изотропного травления кремния, и под этой маской методом ПХТ травились все диэлектрические слои и кремний. Таким образом формировалась подвижная часть кремниевого кристалла (рис. 5).



Рис. 6. Стеклянная пластина Pirex с сформированными электродами

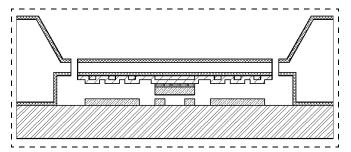


Рис. 7. Готовая структура МЭМС-переключателя

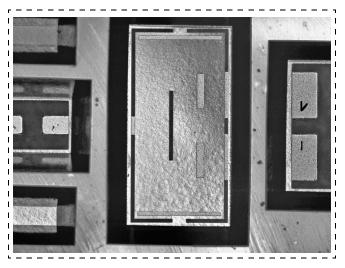


Рис. 8. Фотография МЭМС-ключа

Кристалл из стекла формировался следующим образом. Стеклянная пластина Pirex диаметром 100 мм и толщиной 1 мм подвергалась химической обработке, после чего напылялись слои NiCr толщиной 0,05 мкм и алюминия Al толщиной 1,2 мкм. Затем методом фотолитографии формировалась контактная разводка (рис. 6).

Последней технологической операцией являлось соединение кремниевой пластины со стеклянной. Это соединение осуществлялось методом анодной сварки (рис. 7).

Одной из критических операций в технологии изготовления МЭМС-ключей на основе структур кремний—стекло является операция анодной сварки. В данном процессе структура подвергается как повышенной температуре, так и смещающему напряжению. При этом подвижная часть кремниевого кристалла может слипнуться с неподвижной частью на стекле вследствие электростатических, межатомных сил, а также за счет спекания металлических и диэлектрических слоев. Избежать этого

позволяют специально сформированные неровности на подвижной части кристалла, кроме того, необходимо тщательно отработать процесс анодного соединения, при котором кремний надежно соединяется со стеклом, но при этом слипания электродов не происходит. Экспериментально было установлено, что температура 340 ± 5 °C и смещающее напряжение 350 ± 5 В являются оптимальными для данной конструкции.

Размеры элемента МЭМС-ключа составляли 4×4 мм, рабочая площадь электродов 2 мм 2 , ширина токоведущей линии 0,7 мм, площадь контакта 0,08 мм 2 .

Зазор между электродами МЭМС-ключа составлял около 4 мкм, при этом напряжение включения находилось в пределах 70...90 В. Снизить это значение напряжения можно, либо уменьшив зазор между электродами, что приведет к уменьшению рабочего напряжения, либо путем создания менее жесткой подвижной части, что потребует снижения параметров режима анодной сварки вплоть до неудовлетворительных результатов соединения, кроме того, при этом увеличивается время переключения ключа.

Металлизация МЭМС-ключа осуществлялась из алюминия. Данный факт приводил к тому, что контакты, в частности, шунт и силовая линия в районе замыкания, окислялись, в результате чего в процессе включения МЭМС-ключа не происходило достаточно хорошего замыкания силовой линии (сопротивление замыкания составляло сотни омов и более), а при относительно небольших напряжениях на силовой шине (5...15 В) могло полностью отсутствовать замыкание. Устранить этот недостаток в ряде случаев удавалось путем подачи на силовую линию, в режиме замыкания контактов, напряжения 20...30 В, которое пробивало слои оксида и восстанавливало контакт, но при этом иногда происходило "приваривание" контактов, и размыкание контактов не обеспечивалось.

На рис. 8 представлена фотография электростатического МЭМС-ключа. Рабочее напряжение МЭМС-ключа в разомкнутом состоянии составляло не менее 50 В. В режиме "включено" при сопротивлении ключа порядка 1 Ом конструкция выдерживала ток до 1,5 А. Однако при этом в результате нагрева контактов происходило спекание алюминиевых слоев, и размыкание ключа становилось невозможным.

* * *

Разработанные МЭМС-ключи на структурах кремний — стекло показали их принципиальную работоспособность для коммутаторов постоянного и переменного токов свыше 1 А. Уменьшить напряжение включения можно тремя способами: увеличив площадь электродов, уменьшив жесткость конструкции или уменьшив расстояние ме-

жду электродами. При увеличении площади электродов и уменьшении жесткости увеличивается время переключения ключа. При уменьшении расстояния между электродами уменьшается рабочее напряжение. Избежать слипания электродов в процессе анодной сварки и дальнейшей эксплуатации ключа позволяет формирование массива выступов на подвижном электроде и применение в качестве металлизации Au, Cu/Au, слои Pd.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008—2015 годы, государственный контракт № 16.426.11.0054 от 28 апреля 2012 г.

Список литературы

1. Вардан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их при-

менение. М.: Техносфера, 2004. 528 с. 2. **Mihailovichet R. E.** et al. MEM Relay for Reconfigurable RF Circuits // Microwave and Wireless Components Letters, 2001. Vol. 11, N 2. P. 53.

3. Quetet J. et al. An instrument to measure the stiffness of

MEMS mechanisms // Proc. 10th International Conference on Precision Engineering, Yokohama Japan. July 2001. P. 106. 4. **Seri T.** et. al. Electrostatic Microrelay. USPatent.

N 6,486,425 B2. 26.10.2002.

. Эиоэлектроника

УДК 577.37 + 537.86

О. В. Мосин, канд. хим. наук, научн. сотр., ФГБОУ ВПО "Московский государственный университет прикладной биотехнологии", e-mail: mosin-oleg@yandex.ru,

И. И. Игнатов, доктор наук Европейской академии Естественных наук (Ганновер, ФРГ), директор Научно-исследовательского центра медицинской биофизики, София, Болгария, e-mail: mbioph@dir.bg

ПРИРОДНЫЙ ФОТОПРЕОБРАЗУЮШИЙ ФОТОХРОМНЫЙ БЕЛКОВЫЙ **НАНОМАТЕРИАЛ БАКТЕРИОРОДОПСИН** ИЗ ПУРПУРНЫХ МЕМБРАН ГАЛОБАКТЕРИИ HALOBACTERIUM **HALOBIUM**

Поступила в редакцию 12.11.2012

Описана технология микробиологического синтеза природного фотопреобразующего фотохромного трансмембранного белка, бактериородопсина (выход 8...10 мг), способного преобразовывать световую энергию в электрохимическую энергию генерируемых протонов H^{+} и аденозин-5-трифосфорной кислоты ($AT\Phi$). Эти данные важны для наноиндустрии новых отечественных фотопреобразующих наноматериалов на основе бактериородопсина и биомолекулярной электроники.

Ключевые слова: Halobacterium halobium, пурпурные мембраны, бактериородопсин, биосинтез, биомолекулярная электроника

Введение

Бактериородопсин был впервые выделен из клеточной мембраны экстремальной аэробной фотоорганогетеротрофной палочковидной галобактерии Halobacterium halobium в 1971 г. В. Стохениусом (США) и Д. Остерхельтом (ФРГ) [1]. Он представляет собой хромопротеид с молекулярной массой $M_r = 26,7$ кДа, который содержит в качестве хромоформной группы эквимолекулярную смесь 13-цис- и полностью 13-транс-ретинольного С20каротиноида — аналога витамина А, связанного альдиминной связью с остатком лизина-216. Наряду с бактериородопсином в клеточной мембране галофилов содержатся другие сопутствующие каротиноидные пигменты, основной из которых бактериоруберин, обусловливает окраску галобактерий от розового до красного и красно-оранжевого цветов, что имеет для галофилов важное значение как средство защиты против избыточной радиации и солнечного излучения, так как для мест их обитания характерна высокая освещенность.

Бактериородопсин в центре внимания био- и нанотехнологии благодаря своей высокой светочувствительности и разрешающей способности, и используется в молекулярной биоэлектронике как природный фотохромный материал для управляемых светом или электрическими импульсами модулей компьютерных и оптических систем [2]. Кроме того, бактериородопсин очень привлекателен как модельный объект изучения функциональной активности и структурных свойств фотопреобразующих белков в составе искусственных нативных энерго- и фотопреобразующих мембран и нанопленок [3].

Природные фотопреобразующие наноматериалы на основе бактериородопсина также представляют большую ценность для коммерческой нано- и биотехнологии, микроэлектроники и биофотони-

ки [4]. Например, содержащие бактериородопсин нанопленки, полученные на основе пурпурных мембран галобактерии, используют в качестве компонента в биомолекулярной электронике, где применяются биоматериалы и принципы переработки информации биологическими объектами для создания электронных устройств в вычислительной технике. Впервые в мире нанопленки на основе молекул бактериородопсина были получены и исследованы в нашей стране в рамках проекта "Родопсин", в ходе которого была продемонстрирована эффективность и перспективы использования наноматериалов "Биохром" в качестве фотохромных материалов для голографической записи и микроэлектронных устройств [5]. Эти наноматериалы обратимо изменяют свою структуру в ответ на физические воздействия и генерируют два дискретных состояния, подающихся измерению спектральными методами. Это определяет их использование в качестве логических вычислительных систем. Так, на основе бактериородопсина был сконструирован фоторецептор с микроэлектродом из SnO₂, состоящий из 64 ячеек (пикселей), размером 2.5×2.5 мм и напряжением 0.3...0.7 В. Для преобразования сигналов в данном фоторецепторе слабый ток элементов (3...10 нА) усиливается и при достижении напряжения от 1 до 10 В затем подается на светоизлучающие диоды. Данная конструкция свидетельствует о возможности эффективной интеграции бактериородопсина в современные микроэлектронные системы.

Основной задачей при изготовлении содержащих бактериородопсин нанопленок является ориентация пурпурных мембран между гидрофобными и гидрофильными средами, например между водой и воздухом, как это распространено в природе. Как правило, для улучшения характеристик бактериородопсинсодержащих пленок используются несколько слоев пурпурных мембран, которые наносят на поверхность полимерного носителя — подложки и высушивают в определенных условиях с сохранением природной структуры. Подложку, на которой сформирован препарат, изготавливают из натуральных и синтетических полимеров, гидрогелей, стекла, керамики, металлов и она должна быть электропроводящей, многослойной с функциональными подслоями и т. д. Наилучшие технические показатели достигаются при изготовлении нанопленок на основе желатина. Это позволяет добиться высокой концентрации бактериородопсина (до 50 масс. %) в нанопленках, избежать агрегации фрагментов пурпурных мембран, а также разрушения бактериородопсина в процессе изготовления. Встроенные в желатиновую подложку фрагменты пурпурных мембран с бактериородопсином долговечны (время жизни ~10⁴ часов) и устойчивы к воздействию многих факторов как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации (колебания температуры, интенсивное воздействие светом с помощью лазера и др.). При высыхании пурпурные мембраны укладываются друг на друга, ориентируясь в плоскости подложки. Слой высохших мембран толщиной 1 мкм содержит около 200 монослоев. При освещении в таких сухих нанопленках регистрируется электрический потенциал 100...200 мВ, совпадающий со значением мембранного потенциала живой клетки.

Большой научно-практический интерес к получению препаратов бактериородопсина для реконструкции нанопленок определил цель настоящей работы, связанной с разработкой технологии выращивания галобактерии *Halobacterium halobium* и оптимизацией условий выделения чистого бактериородопсина в микропрепаративных количествах.

Структура и механизм функционирования бактериородопсина

По своей структуре и расположению в мембране клетки бактериородопсин относится к интегральным трансмембранным белкам (рис. 1), пронизывающим всю толщу клеточной мембраны, которая подразделяется на три фракции: желтую, красную и пурпурную. Содержащая 75 масс. % бактериородопсина пурпурная фракция в составе каротиноидов, фосфолипидов (в основном диэфиры фосфоглицерина с небольшим содержанием неполярных липидов и изопреноидов) и воды образует естественные двумерные кристаллы, которые можно исследовать с помощью электронной микроскопии и дифракционных методов анализа рассеивания рентгеновского излучения, электронов и нейтронов на поверхности кристаллов пурпурных мембран. Этими методами было установлено существование в молекуле бактериородопсина семи спиральных белковых сегментов, в середине которых симметрично расположена хромофорная часть молекулы в виде остатка ретиналя.

Полипептидная цепь бактериородопсина состоит из 248 аминокислотных остатков, 67 % которых являются гидрофобными [6], а 33 % — гидрофильными остатками из аспарагиновой и глутаминовой кислот, аргинина и лизина (рис. 2, а). Эти остатки играют важную структурно-функциональную роль в пространственной ориентации α-спиральных сегментов молекулы бактериородопсина, которая организована в пурпурной мембране упорядоченно в виде триммеров со средним диаметром около 0,5 мкм и толщиной 5...6 нм; каждый триммер окружен шестью другими так, что образуется правильная гексагональная кристаллическая решетка (рис. 2, б). Отдельная молекула бактериородопсина состоит из семи находящихся в конформации аспирали сегментов (A-G), расположенных в направлении, перпендикулярном плоскости цитоплазматической мембраны (рис. 2, в). Гидрофобные домены представляют собой трансмембранные сегменты, а гидрофильные домены выступают из мембраны и соединяют отдельные внутримембранные α-спиральные сегменты белковой части молекулы бактериородопсина. Наряду с бактерио-



родопсином пурпурные мембраны содержат липиды, каротиноиды и воду [7].

Бактериородопсин выполняет в клетке галофилов функции светозависимого протонного насоса, перекачивающего протоны через мембрану клетки и создающего электрохимический градиент протонов H^+ на поверхности клеточной мембраны,

энергия которого используется клеткой для синтеза аденозин-5-трифосфорной кислоты (АТФ) в анаэробном фотосинтетическом фосфорилировании. Этот механизм синтеза АТФ получил название "бесхлорофильный фотосинтез" в отличие от реализуемого растениями фотосинтеза с участием хлорофилла. В этом механизме при каждом погло-

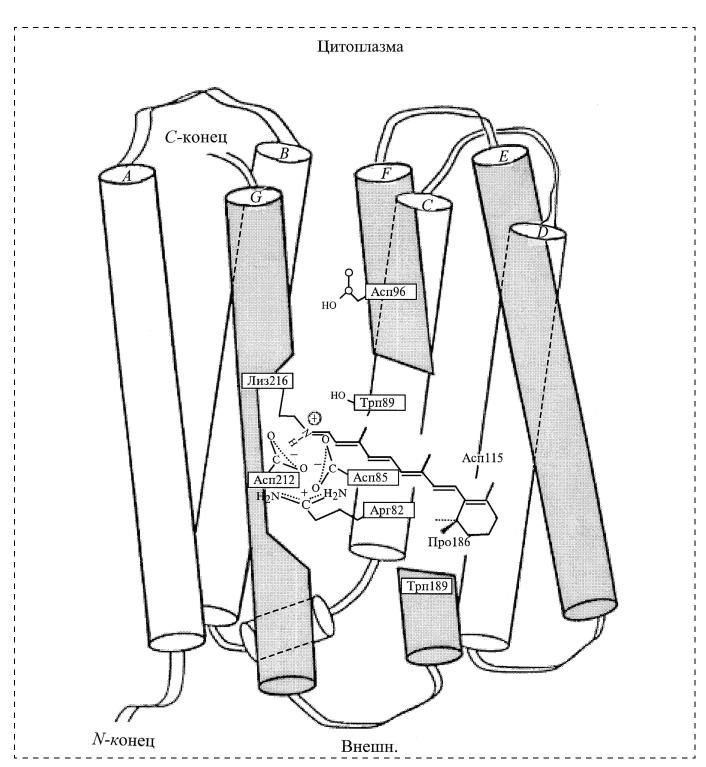


Рис. 1. Расположение белковой части молекулы бактериородопсина и остатка ретиналя в клеточной мембране галобактерии *Halobacterium halobium* по данным компьютерного моделирования:

латинскими буквами обозначены белковые фрагменты молекулы бактериородопсина в виде семи пронизывающих клеточную мембрану α -спиральных сегментов; обозначены: русскими буквами — аминокислотные остатки в белковом фрагменте; темным цветом — сегменты, ответственные за связывание остатка ретиналя в молекуле бактериородопсина с белковой частью молекулы

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 7, 2013 ———









щении молекулой кванта света бактериородопсин обесцвечивается, вступая в цикл фотохимических превращений, в результате происходит высвобождение протона на внешней стороне мембраны и поглощение протона из внутриклеточного пространства. Вследствие этого между внутренней и внешней сторонами цитоплазматической мембра-

ны устанавливается градиент концентрации протонов H^+ [8].

Механизм последующего переноса Н⁺ через мембрану клетки включает цепь водородных связей, образованных боковыми радикалами гидрофильных аминокислот и простирающихся через всю толщу белка. Протонная проводимость обес-

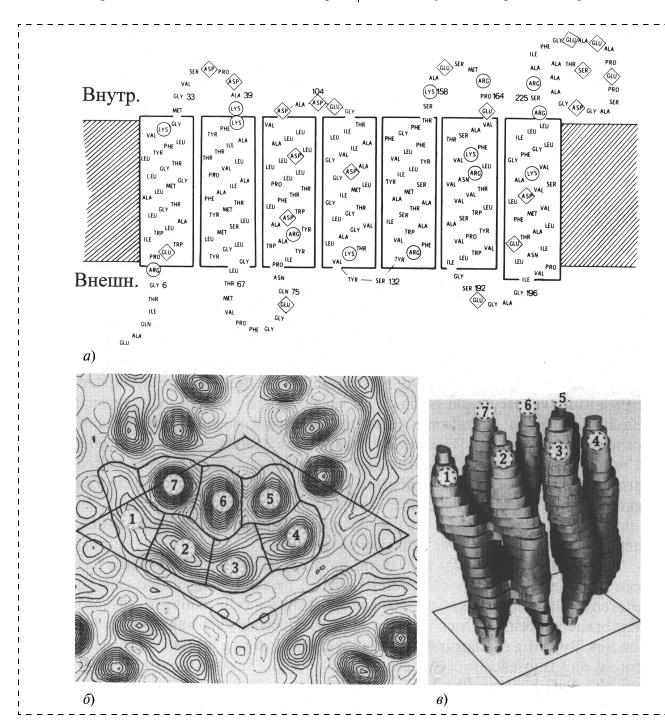


Рис. 2. Структура молекулы бактериородопсина по данным дифракционного анализа:

a — первичная структура молекулы бактериородопсина (аминокислоты обозначены латинскими символами; кружками и ромбами показаны функционально важные аминокислоты — лизин (LYS), аргинин (ARG), аспарагиновая (ASP) и глутаминовая (GLU) кислоты, ответственные за пространственную ориентацию α -спиральных сегментов белковой части молекулы и формирование каналов для транслокации протонов H^+ через клеточную мембрану); δ — карта электронной плотности пурпурных мембран (в центре обведена отдельная молекула белка). Цифрами 1—7 обозначены α -спиральные сегменты молекулы бактериородопсина: 1 — 4-сегмент; 2 — 4-сегмент; 4
печивается в том случае, если белок состоит из двух участков и содержит функциональную фотохромную группу, способную под воздействием кванта света изменять свое микроокружение и тем самым последовательно соединять и разъединять участки связывания и переноса Н⁺ через клеточную мембрану. Роль такого переносчика между двумя белковыми проводниками Н⁺, один из которых сообщается с внешней, а другой — с цитоплазматической поверхностью мембраны клетки, играет ретиналь, связанный альдиминной связью (как в зрительных пигментах животных) с остатком лизина-216 белкового фрагмента молекулы бактериородопсина. Ретиналь имеет 13-транс-конформацию и располагается в мембранном туннеле между белковыми α-сегментами, блокируя поток протонов. При поглощении кванта света происходит обратимая световая фотоизомеризация 13-Z-БР ($\lambda_{\text{макс}} = 548$ нм) в *all-E*-БР $(\lambda_{\text{макс}} = 568 \text{ нм})$ [9], инициирующая каскад быстрых фотохимических реакций продолжительностью от 3 мс до 1 пс, с образованием промежуточных интермедиантов J_{625} , K_{590} , L_{550} , M_{412} , N_{560} и O_{640} с последующим отрывом H^+ от ретинального остатка бактериородопсина и его присоединением со стороны цитоплазмы (рис. 3). В процессе фотоизомеризации молекула ретиналя изгибается в мембранном туннеле, формируя канал трансмембранного переноса протонов из цитоплазмы во внешнюю среду, и переносит протон Н с внутренней цитоплазматической мембраны на внешнюю мембрану клетки. При этом протон из ретинального остатка переносится на остаток Асп85, после чего образовавшаяся вакансия заполняется протоном, перешедшим с Асп96. В результате между внутренней и внешней поверхностью мембраны образуется градиент концентрации Н⁺, приводящий к тому, что при освещении светом клетки начинают синтезировать АТФ, т. е. преобразуют энергию света в химическую энергию связей. Этот процесс обратим и в темноте протекает в обратном направлении, когда бактериородопсин самопроизвольно возвращается в исходную форму [10]. Таким образом, молекула бактериородопсина ведет себя как фотохромный переносчик с малым временем релаксации переходом из возбужденного состояния в основное. Оптические и динамические характеристики бактериородопсина изменяются в зависимости от условий получения пурпурных мембран и составом полимерной матрицы.

Содержащие бактериородопсин пурпурные мембраны устойчивы к солнечному свету, воздействию кислорода, температуре более чем 80 °С (в воде) и до 140 °С (на воздухе), рН, равному 1...12, высокой концентрации NaCl (15...20 масс. %), действию большинства ферментов-протеаз, к неполярным растворителям типа гексана, но чувствительны к смесям полярных органических растворителей с водой. Эти факторы имеют большое практическое значение для встраивания пурпурных мембран в полимерные наноматрицы с сохранением фотохимических свойств.

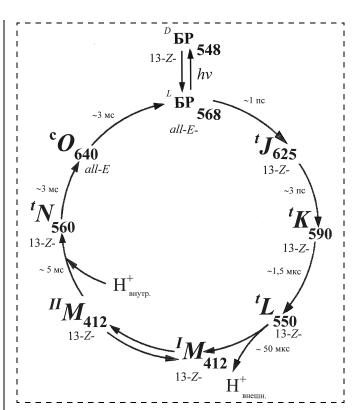


Рис. 3. Схема фотохимического цикла молекулы бактериородопсина (водная суспензия, pH = 7,2, 20 $^{\circ}$ C)

Биосинтез бактериородопсина

Технология получения бактериородопсина заключается в культивировании галобактерий в жидких синтетических средах (с 15...20 масс. % NaCl), содержащих аминокислоты, или в природных средах с пептонами — смесями полипептидов и аминокислот, получаемыми из продуктов неполного гидролиза сухого молока или мяса животных поддействием протеолитических ферментов (пепсин, трипсин, химотрипсин), или на белково-витаминном концентрате (БВК) дрожжей. Последующее выделение бактериородопсина из пурпурных мембран клеток осуществляют комбинацией методов физико-химического разделения.

Для биосинтеза бактериородопсина использовали мутантный каротиноидсодержащий штамм экстремальных фотоорганогетеротрофных галобактерий *Halobacterium halobium* ET 1001, полученный из коллекции культур МГУ. Штамм модифицирован селекцией отдельных синтезирующих бактериородопсин колоний пурпурно-красного

цвета на твердой (2 %-ный агар) пептоновой среде с 4,3 М NaCl. Полученный селекцией штамм галобактерий культивировали в жидкой комплексной синтетической среде (количества компонентов приведены в г/л), содержащей:

- 18 аминокислот: *D*, *L*-аланин 0,43; *L*-аргинин 0,4; *D*, *L*-аспарагиновая кислота 0,45; *L*-цистеин 0,05; *L*-глутаминовая кислота 1,3; *L*-глицин 0,06; *D*, *L*-гистидин 0,3; *D*, *L*-изолейцин 0,44; *L*-лейцин 0,8; *L*-лизин 0,85; *D*, *L*-метионин 0,37; *D*, *L*-фенилаланин 0,26; *L*-пролин 0,05; *D*, *L*-серин 0,61; *D*, *L*-треонин 0,5; *L*-тирозин 0,2; *D*, *L*-триптофан 0,5; *D*, *L*-валин 1,0 г/л;
- нуклеотиды: аденозин-5-монофосфат 0,1; уридин-5-монофосфат 0,1 г/л;
- соли: NaCl 250; MgSO₄ 7H₂O 20; KCl 2,0; NH₄Cl 0,5; KNO₃ 0,1; KH₂PO₄ 0,05; K₂HPO₄ 0,05; Na⁺-цитрат 0,5; MnSO₄ · 2H₂O $3 \cdot 10^{-4}$; CaCl₂ · 6H₂O 0,065; ZnSO₄ · 7H₂O $4 \cdot 10^{-5}$; FeSO₄ · 7H₂O $5 \cdot 10^{-4}$; CuSO₄ · 5H₂O $5 \cdot 10^{-5}$ г/л;
- глицерин 1,0 г/л;
- ростовые факторы: биотин $-1 \cdot 10^{-4}$; фолиевая кислота $-1.5 \cdot 10^{-4}$; витамин $B_{12} 2 \cdot 10^{-5}$ г/л.

Выращивание бактерий проводили в колбах Эрленмейера вместимостью 500 мл (объем реакционной смеси — 100 мл) в течение 3...4 сут при 35...37 °С в условиях интенсивной аэрации (расход воздуха — 0.5...2.0 л/мин на 1 л среды) в орбитальном шейкере 380-S ("Biorad", Венгрия) и освещении монохромными люминесцентными лампами ЛДС-40-2 (40 Bt, OOO "Альфа-Электро", Россия) -(три лампы освещенностью 1,5 лк. Бактериальный рост изучали по оптической плотности D бактериальной суспензии, измеренной при длине волны $\lambda = 620$ нм на спектрофотометре Beckman DU-6 (Beckman Coulter, США). Процедура выделения бактериородопсина из пурпурных мембран галобактерий и все последующие стадии выделения и очистки белка проводили с использованием светозащитной лампы, снабженной оранжевым светофильтром OPЖ-1X (75 × 50 см) (*Marbel*, Германия).

По данным суточных измерений оптической плотности построены кривые бактериального роста в синтетической среде, показанные на рис. 4 (кривая 2) относительно контроля (кривая 1) на пептоновой среде. В данных экспериментальных условиях в клетке синтезируется каротиноидсодержащий фиолетовый пигмент, идентифицируемый как природный бактериородопсин по спектральному соотношению белкового и хромофорного фрагментов молекулы $D_{280}/D_{568}=1,5:1.$ Как показали результаты исследования, рост галобактерий Halobacterium halobium в синтетической среде (рис. 4, кривая 2) ингибировался незначительно по сравнению с контролем (рис. 4, кривая І) в пептоновой среде, что существенно упрощает и удешевляет оптимизацию условий биосинтеза бактериородопсина. Они заключаются в выращивании галобактерий в синтетической среде при освещении монохромным све-

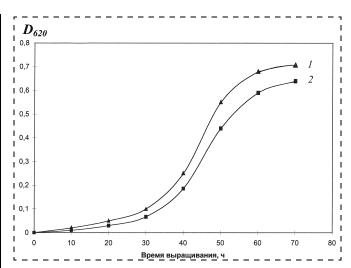


Рис. 4. Динамика роста галобактерии *Halobacterium halobium*, измеренная по оптической плотности клеточной суспензии (D) при λ = 620 нм на спектрофотометре Beckman DU-6 (*Beckman Coulter*, США) в различных экспериментальных условиях:

1 — пептоновая среда; 2 — комплексная синтетическая среда. Условия выращивания: период инкубации 4...5 сут при $35\,^{\circ}$ C, освещение монохромным светом с длиной волны $\lambda=560\,$ нм. В качестве контроля использовали пептоновую среду

том с длиной волны $\lambda = 560$ нм в течение 4...5 сут при 35 °C. Существенным преимуществом является то, что в отличие от пептоновой среды, синтетическая среда не содержит в своем составе загрязняющих белковых продуктов, которые могут усложнить последующее выделение и очистку бактериородопсина.

Выделение и очистка бактериородопсина

Основные этапы получения бактериородопсина следующие:

- выращивание галобактерий *Halobacterium halo*bium на синтетической среде;
- дезинтеграция клеток и лизис клеточных стенок;
- выделение фракции пурпурных мембран;
- очистка пурпурных мембран от низко- и высокомолекулярных примесей, клеточной рибонуклеиновой кислоты (РНК), каротиноидов и липидов;
- растворение пурпурных мембран в 0,5 %-ном растворе ионного детергента додецилсульфата натрия (ДДС-Nа) с образованием микроэмульсии;
- осаждение бактериородопсина из микроэмульсии метанолом;
- гель-проникающая хроматография (ГПХ) на сефадексе G-200;
- электрофорез в 12,5 %-ном полиакриламидном (ПААГ) геле с 0,1 %-ным ДДС-Nа.

Поскольку выделяемый белок локализуется в пурпурных мембранах, освобождения от низкомолекулярных примесей и внутриклеточного содержимого достигали осмотическим шоком клеток дистиллированной водой на холоде после удаления 4,3 М NaCl и последующим разрушением клеточной оболочки ультразвуком с частотой 22 кГц. Последующую обработку клеточного гомогената ферментом РНК-азой I (активность — 2...3 ед. акт.)

проводили для разрушения клеточной РНК. В результате получаются фрагменты пурпурных мембран, содержащих бактериородопсин. Поскольку фракция пурпурных мембран наряду с выделяемым белком в комплексе с липидами и полисахаридами содержала примесь связанных каротиноидов и посторонних белков, применяли специальные методы фракционирования белка без повреждения его природной структуры и диссоциации ретинального остатка. Это существенно усложняло задачу выделения индивидуального бактериородопсина с применением методов декаротинизации и делипидизации (удаление каротиноидов и липидов), а также очистки и колоночной ГПХ на сефадексе. Декаротинизация, заключающаяся в многократной обработке суспензии пурпурных мембран 50 %-ным этанолом при 4 °C, являлась рутинным, но обязательным этапом, несмотря на значительные потери хромопротеина. Проводили не менее пяти обработок 50 %-ным этанолом, чтобы получить спектры поглощения суспензии очищенных от каротиноидов (4) и (5) пурпурных мембран (степень хроматографической чистоты 80... 85 %), показанные на рис. 5 на различных стадиях обработки (B) и (C) относительно природного бактерио-

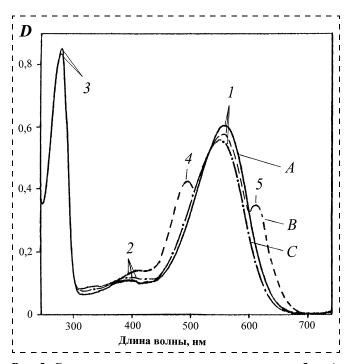


Рис. 5. Спектры поглощения суспензии пурпурных мембран (в 50 %-ном растворе этанола (в ${\rm H_2O}$)), измеренные на спектрофотометре Beckman DU-6 (*Beckman Coulter*, CIIIA), на различных стадиях обработки:

A— природный бактериородопсин; B— пурпурные мембраны после промежуточной обработки; C— очищенные от посторонних каротиноидов пурпурные мембраны. Пик I соответствует основной спектральной форме бактериородопсина $\mathrm{EP}_{568},\ 2$ — примесь спектральной формы мета-бактериородопина $M_{412},\ 3$ — общий пик поглощения ароматических аминокислот, 4 и 5—пики посторонних каротиноидов. В качестве контроля использовали природный бактериородопсин. Вертикальная ось D означает поглощение (отн. ед.), горизонтальная ось — диапазон длин волн (нм) при сканировании спектрофотометром

родопсина (A). Образование 13-ретинальпротеинового комплекса в молекуле бактериородопсина приводит к батохромному сдвигу в спектре поглощения пурпурных мембран (C) — основной пик Iпри максимуме поглощения λ = 568 нм, вызванный световой изомеризацией хромофора по $C_{13} = C_{14}$ -кратной связи определяется наличием 13-транс-ретинального остатка в основной спектральной форме БР₅₆₈, дополнительный малоинтенсивный пик 2 при $\lambda = 412$ нм характеризует незначительную примесь образующейся на свету спектральной формы мета-бактериородопсина M_{412} с депротонированной альдиминной связью между остатком 13-транс-ретиналя и белком, а общий для всех спектров пик 3 при $\lambda = 280$ нм определяется поглощением ароматических аминокислот (фенилаланин, тирозин, триптофан) в полипептидной цепи белка (для чистого бактериородопсина соотношение поглощений D_{280}/D_{568} равно 1,5:1). Данная технология биосинтеза бактериородопсина позволяет для лучшего результата контролировать содержание ароматических аминокислот — фенилаланина, тирозина и триптофана в ростовой среде штамма-продуцента, добавляемых в количествах 0,26, 0,2 и 0,5 г/л.

Фракционирование и тщательная хроматографическая очистка белка являлись следующим необходимым этапом. Поскольку бактериородопсин, будучи трансмембранным белком, пронизывает билипидный слой в виде семи а-сегментов, применение сульфата аммония и других традиционных высаливающих агентов не дает положительного результата при выделении белка. Решение задачи заключалось в переводе белка в растворимую форму за счет коллоидного растворения (солюбилизации) полученной фракции пурпурных мембран в 0,5 %-ном растворе ДДС-Na с последующим низкотемпературным осаждением белка метанолом. Использование в качестве ионного детергента ДДС-Na диктовалось необходимостью максимальной солюбилизации белка с комбинированием стадии делипидизации и осаждения в нативном (с сохранением природной конфигурации) виде, поскольку солюбилизированный в ДДС-Nа бактериородопсин сохраняет спиральную α-конфигурацию. Поэтому отпала необходимость использования органических растворителей — ацетона, метанола и хлороформа для очистки от липидов, а делипидизацию и осаждение белка совмещали в одну единственную стадию, существенно упрощающую фракционирование белка и уменьшающую его потери при выделении. Значительным преимуществом метода является тот факт, что целевой белок в комплексе с молекулами липидов и детергента распределяется в надосадочной жидкости, а другие высокомолекулярные примеси и остатки клеточных мембран в непрореагировавшем осадке, легко отделяемом центрифугированием. Фракционирование солюбилизованного в 0,5 %-ном ДДС-Nа белка с его последующим выделением в кристаллическом виде проводили в три стадии дробным осаждением ме(1200 g, 15 мин).

танолом при 4 °C, уменьшая концентрацию детергента от 0,5 до 0,2 и 0,1 %. Кристаллический белок (8...10 мг) промывали холодной дистиллированной водой (2 × 1 мл) и осаждали центрифугированием

Окончательная стадия очистки бактериородопсина заключалась в отделении белка от низкомолекулярных примесей методом ГПХ, для чего содержащие бактериородопсин фракции дважды пропускали через колонку (150 × 10 мм) с декстрановым сефадексом G-200 (*Pharmacia*, США) (размер гранул — 40...120 мкм). Колонку уравновешивали буферным раствором, содержащим 0,1 %-ный ДДС-Nа и 2,5 мМ раствор этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭТДА). Пробу белка растворяли в 100 мкл буферного раствора и элюировали 0,09 М Трис-боратным буфером, содержащим 0.5 M NaCl c pH = 8.35 (ионная сила растворителя I = 0.075 моль/л) со скоростью 10 мл/см² · ч. Содержание белка в отобранных пробах определяли спектрофотометрически по соотношению поглощений D_{280}/D_{568} (молярные коэффициенты светопоглощения при длинах волн $\lambda = 280$ нм и $\lambda = 568$ нм: $\epsilon_{280} = 1.1 \cdot 10^5 \, \text{M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ и $\epsilon_{568} = 6.3 \cdot 10^4 \, \text{M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$). Объединенные белковые фракции подвергали вакуумной сублимационной сушке, запаивали в стеклянные ампулы (10 × 50 мм) и хранили в морозильной камере холодильника при -15 °C.

Идентификацию бактериородопсина проводили электрофорезом в 12,5 %-ном ПААГ с 0,1 %-ным ДДС-Nа в соответствии с протоколом фирмы *LKB* (Швеция). Количественное определение содержания белка выполняли сканированием прокрашенного в растворе индикатора "кумасси-голубой R-250" электрофоретического геля на лазерном денситометре Beckman CDS-200 (*Beckman Coulter*, США).

Конечную идентификацию бактериородопсина проводили регенерацией свободных от ретиналя апомембран с 13-транс-ретиналем. Для получения свободных от ретиналя апомембран суспензию пурпурных мембран (50 мг) в 50 мл 1 М NH₂OH (рН = 6,0) выдерживали 10 ч при перемешивании на ледяной бане (0 °C) при освещении реакционной смеси ксеноновой лампой ДКСТВ-6000 (ОАО "МЭЛЗ", Россия). Осадок отделяли центрифугированием (1000 g, 10 мин), дважды промывали дистиллированной водой и центрифугировали. Фракцию апомембран суспендировали в 2 мл 5 мМ 2-(N-морфолино)-этансульфониламида в 100 мМ NaCl. Для регенерации апомембран с 13-транс-ретиналем к 2 мл суспензии апомембран $(2 \cdot 10^{-5} \text{ M})$ в кварцевой кювете (10 × 10 мм) добавляли при перемешивании 0,1 мл 2 мМ раствора 13-транс-ретиналя в метаноле и выдерживали 6...8 ч в темноте при 40 °C. Степень регенерации определяли спектрофотометрически по соотношению $D_{\rm Hat}$ 280 $D_{\rm Hat}$ 568 $/D_{\rm per}$ 280 $D_{\rm per}$ 568, где D_{280} и D_{568} — поглощение суспензии нативных и регенерированных апомембран при длинах волн $\lambda = 280$ нм и $\lambda = 568$ нм.

Заключение

Данная технология биосинтеза бактериородопсина свидетельствует о достаточно высоких выходах синтезируемого продукта. В результате получено 8...10 мг чистого бактериородопсина из 1 г бактериальной биомассы галобактерий, гомогенность, степень очистки и структура которого удовлетворяет требованиям, предъявляемым для конструкции нанопленок и искусственных мембран на основе бактериородопсина. Для обеспечения более высоких выходов бактериородопсина необходимо наработать большее количество сырьевой биомассы, чего можно легко достичь в лабораторных условиях. Главное достоинство метода состоит в том, что выделенный данным методом бактериородопсин сохраняет природную конфигурацию и способность к фотохимическим превращениям in vitro, что важно для дальнейшего использования полученных образцов бактериородопсина для конструирования содержащих бактериородопсин фотопреобразующих пленок.

Работа осуществлялась при поддержке Научноисследовательского центра медицинской биофизики (Болгария), грант № 012.

Список литературы

- 1. **Oesterhelt D., Stoeekenius W.** Rhodopsin like protein from the purple membrane of Halobacterium halobium // Nature. 1971. V. 233. № 89. P. 149—160.
- 2. **Hampp N., Oesterhelt D.** Bacteriorhodopsin and its Potential in Technical Applications // Nanobiotechnology / Ch. Niemeyer and C Mirkin, eds. Weinheim: Wiley-VCH-Verlag, 2004. P. 146—167.
- 3. **Мосин О. В., Складнев Д. А., Швец В. И.** Включение дейтерированных ароматических аминокислот в молекулу бактериородопсина *Halobacterium halobium* // Прикладная биохимия и микробиология. 1999, Т. 35, № 1. С. 34—42.
- 4. **Vought B. W., Birge R. R.** (eds.) Molecular electronics and hybrid computers // Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. New-York: Wiley-Interscience, 1999. P. 477—490.
- 5. **Lanyi J. K.** Understanding structure and function in the light-driven proton pump bacteriorhodopsin // Journal of Structural Biology. 1998. V. 124. P. 164—178.
- 6. **Мосин О. В., Складнев Д. А., Егорова Т. А., Швец В. И.** Получение бактериородопсина *Halobacterium halobium*, меченного дейтерием по остаткам ароматических аминокислот фенилаланина, тирозина и триптофана // Биотехнология. 1996. № 10. С. 24—40.
- 7. **Grigorieff N.** Electron-crystallographic refinement of the structure of bacteriorhodopsin // Journal of Molecular Biology. 1996. V. 259. P. 393—421.
- 8. **Oesterhelt D.** Bacteriorhodopsin as an Example of a Light-Driven Proton Pump. New York: Angew. Chemie, Intern., 1976. P. 16—24.
- 9. **Haupts U., Tittor J., Bamberg E., Oesterhelt D.** General Concept for Ion Translocation by Halobacterial Retinal Proteins: The Isomerization/Switch/Transfer Model // Biochemistry. 1997. V. 36. № 2–7. P. 78–85.
- 10. Mosin O. V., Karnaukhova E. N., Pshenichnikova A. B. Electron impact mass-spectrometry in bioanalysis of stable isotope labeled bacteriorhodopsin // Proc. of 6th Intern. Conf. on Retinal proteins. Leiden: Leiden University Press, 1994. P. 115.



CONTENTS

Zablotsky A. V., Viryus A. A., Kaminskaya T. P., Korovushkin V. V., Kuzin A. Yu., Stepovich M. A., Todua P. A., Filippov M. N., Shipko M. N. Local Characteristics of Precision Alloys of Fe ₃ (SiAl) after Magnetopulse Processing
sing
Khlopov B. V., Samoylovich M. I., Bovtun B. Investigation of the Multiplier Effect of Electromagnetic Fields in Proximity Devices Erasing from Electronic Media Using Nanocomposites Based on Opal Matrices 6 Investigate the properties of metamaterials based on samples of opal matrices for contactless devices erasing from electronic media. Developed a method for estimating the susceptibility to magnetic fields of samples of composite materials when subjected to external electromagnetic fields. The experimental results of the multiplier effect of electromagnetic fields in the system design field generator erasing at frequencies below 500 kHz. Experimentally confirmed that the frequency range up to 500 kHz electromagnetic immunity test samples varies by changing the strength of the electromagnetic field in the system design field generator erasure. The experimental characteristics of spatial multiplexing of electromagnetic fields on the semiconductor storage device. Submitted design decision to make the system field generator Erasers. Keywords: nanoparticles, metamaterials, nanocomposite materials, animation, electromagnetic field, the phase velocity, thin film layer field generator system, washing device
Amelichev V. V., Blagov E. V., Gavrilov R. O. Technological Characteristics of Wireless Magnetoresistive MEMS Motion Parameters
Belahurau Ya. A., Gorokh G. G., Taratyn I. A., Khatko V. V. Sensetive Element of Ring Gyroscope Based on Nanoporous Anodic Alumina
Sergeeva A. S., Pleshkov D. N., Gorin D. A. Micro- and Nanostructured Photovoltaic Converters 20
This review presents a modern results and main tendencies of development in the field of semiconductor photoenergy converters. It is considered in detail the different structures of photovoltaic cells, their working principles, characteristics, peculiarity of fabrication technology. New directions of semiconductor photovoltaic, which are connected with the using of a photonic crystal, multilayer fibers, surface plasmon resonance structures, core-shell microparticles are discussed. Keywords: photovoltaic converters, spherical solar cells, nanowires, photonic crystal, multilayered fibers, surface plasmon resonance structures
Kernbach S. Exploring a High-Penetrating Capability of LED and Laser Emission. Part 2
НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 7, 2013



such as reinforced concrete steel constructions. Field experiments are performed at distance of 1,65 km. In total about 100 independent experiments with 700 measurements are performed. The second part of this work surveys performed experiments and obtained results. Attention is paid to minimizing and removing such factors as variation of temperature and EM fields, light, acoustic and mechanical impacts from influence on the results. We consider the hypothesis about a high-penetrating component of the emission as well as its application in development of microsensors for deep-water emergency communication systems.

Keywords: underwater communication systems, LED/laser emission, sensors based on electric double layers, high-penetrating component of the emission

Keywords: amplifier, millimeter wave radiation, resonator, klystron, finite difference time domain method

Keywords: MEMS switch, the electrostatic actuator, operating voltage, metal aluminum

Mosin O. V., Ignatov I. I. The Natural Photo-Transforming Photochrome Transmembraine Protein Nanomaterial Bacteriorhodopsin from Purple Membranes of Halobacterium Halobacterium Halobium 47 The article presents the technology of microbiological synthesis of natural photo-transforming photochrome transmembraine protein bacteriorhodopsin (output 8...10 mg), which is capable to transform light energy to electro-chemical energy of generated protons H⁺ and adenosine-5-triphosphate (ATP). These data are important for nano-industry of new modern domestic photo-transforming nanomaterials on the base of bacteriorhodopsin and molecular bioelectronics.

Keywords: Halobacterium halobium, purple membranes, bacteriorhodopsin, biosynthesis, biomolecular electronics

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)

The journal bought since november 1999.

Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev, Deputy of Editor-in-Chief Victor V. Luchinin, Russia, Michael S. Shur (USA) ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru; http://novtex.ru/nmst/

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.

Дизайнер T. H. Погорелова. Технический редактор E. M. Патрушева. Корректор T. B. Пчелкина

Сдано в набор 21.05.2013. Подписано в печать 26.06.2013. Формат 60×88 1/8. Заказ МС713. Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз».

Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.

·

— НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 7, 2013



