TAIO- & MUKPOGIGIEMHAA

№ 11(148) **♦ 2012**

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. Издается с 1999 г.

Зам. гл. редактора Лучинин В. В.

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. 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. Андриевский Р. А. Антонов Б. И. Арсентьева И. П. 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. Норенков И. П. Панич А. Е. Панфилов Ю. В. Петросянц К. О. Петрунин В. Ф. 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. Чугунова А. В. Учредитель: Излательство

"Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ	· ·	
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ Вернер В. Д., Мальцев П. П., Сауров А. Н. МЭМо революция	Си третья индустриальная	2
НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРО	оскопия	
Воробьева А. И., Шулицкий Б. Г. Формирование и металлических электродах с использованием пори МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИИ	массивов углеродных трубок на стого оксида алюминия Е МНСТ	5
Малышев К. В. Терагерцовый квантовый каскадни	ый лазер на квазипериодических	
сверхрешетках	оделирование на субнанометровом проком пр	12
электронный проводник/твердый электролит		15
Голоденко Б. А., Голоденко А. Б. Фрактальное мод порождения аморфности тетраэдрической атомной Амеличев В. В., Буданов В. М., Гусев Д. В., Миха Суханов В. С. Тихонов Р. Л. Конструкция и техна	делирование механизма й структуры	23
преобразователей давления для эндоскопических т МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧ	гактильных датчиков	27
Гетьман С. В., Алексеев С. А., Пинаев В. В., Дзюб корпусирования кристалла ПАВ-метки для систем для авто- и железнодорожного транспорта.	баненко С. В. Технология 1 радиочастотной идентификации	30
Антипов А. А., Аракелян С. М., Кутровская С. В., Осипов А. В., Зимин С. П. Лазерное получение ко халькогенидов свинца и их осаждение на подложк технологии	Кучерик А. О., Макаров А. А., млоидных систем из наночастиц су с использованием капельной	34
ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ		
Драгунов В. П., Доржиев В. Ю. Микроэлектромех дупликатора Беннета Располов В. Я., Иванов Ю. В., Парамонов П. П.,	канический генератор на основе Сабо Ю. И., Матвеев В. В.,	39
Шведов А. П. Резервная бесплатформенная систем измерительной базе	ма ориентации на отечественной	43
Системы на кристалле Мальцев П. П., Матвеенко О. С., Гнатюк Д. Л., J Крапухин Д. В., Бунегина С. Л. Многослойные пл Обеспечение многочастотного режима круговой и. изпучения	Іисицкий А. П., Федоров Ю. В., анарные антенны. Часть 2. ли эллиптической поляризации	46
Сеничкин А. П., Бугаев А. С., Ячменев А. Э. Особ характеристик системы нанонитей из атомов олова	енности вольт-амперных а, встроенных в кристалл арсенида	
сопtents.		52 55
Аннотаци на русском и английском языках с 1 в свободном доступе на сайтах журнала (http://novto научной электронной библиотеки (http://elibrary.ru статей расположены на сайте журнала: с 1999 г. по 20	1999 г. по настоящее время находятся ex.ru/nmst/, http://www.microsystems.ru) и 1). Электронные версии полнотекстовых 010 г. в разделе "АРХИВ".	1 1 X
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", 2012

Общие вопросы

УДК 621.38

В. Д. Вернер¹, д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: V.Verner@tcen.ru, **П. П. Мальцев**², д-р техн. наук, проф., директор, **А. Н. Сауров**³, д-р техн. наук, член-корр. РАН, директор

1 НПК "Технологический центр"

² Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН

МЭМС И ТРЕТЬЯ ИНДУСТРИАЛЬНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

Поступила в редакцию 29.06.2012

На основании анализа содержания ряда международных конференций, проведенных в начале 2012 г., показана определяющая роль МЭМС в развитии третьей индустриальной революции.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, беспроводные сенсоры, глобальные проекты, Интернет для вещей, мониторинг, индустриальная революция

МЭМС были разработаны в фирме Bell практически одновременно с транзистором в конце сороковых — в начале пятидесятых годов прошлого века. Оба эти изделия являются комплектующими систем электроники. Необходимость в комплектующих определяется потребителями — изготовителями электронных систем и различной аппаратуры на их основе.

Возможность использования транзисторов в вычислительной и телекоммуникационной технике, особенно после появления интегральных микросхем (ИС), способствовала экспоненциальному росту выпуска ИС в соответствии с законом Мура. Потребность МЭМС для вычислительных систем существенно меньше, например для головок принтеров и головок записи/считывания устройств памяти. Ситуация изменилась после доступа МЭМС на рынки автомобильной, связной, медицинской и бытовой техники. Использование МЭМС имеет такой порядок:

- авто высокого класса до 100;
- мобильные телефоны 6...10;
- смартфоны 10...20;
- умный дом 10...100;
- медицинские приборы до 100.

Разрыв в объемах рынков полупроводниковой электроники и МЭМС сохраняется до сего времени. Но темпы роста рынка по отдельным типам МЭМС часто превышают темпы роста сегментов рынка ИС.

Рынок МЭМС оценивается разными аналитическими фирмами. Оценки могут расходиться по значениям, но нас интересует качественная тенденция изменений, которая в целом совпадает у различных фирм. Поэтому как базовую оценку мы использовали анализы фирмы Yole Developpement [1]. По ее данным можно оценить объем рынка в 2011 г. на уровне 300 млрд долл. для полупроводниковой электроники и 10 млрд долл. для МЭМС. Таким образом, рынок МЭМС в 30 раз меньше. Можно ли сократить этот разрыв? Можно, если сохранится общая тенденция роста рынка МЭМС. При этом хотя бы для части изделий темпы роста будут выше, чем для ИС.

По данным [1] объем рынка МЭМС в 2016 г. будет на уровне 20 млрд долл. Темпы роста в 2011 г. порядка 29 %, средний темп — 14 %, при этом увеличение числа штук изделий 20,7 %, т. е. цена отдельного изделия уменьшается. В 2004-2011 гг. рынок инерциальных сенсоров вырос на 100 %, а для МЭМС-микрофонов в 2011 г. рост составил 63 %. Введение на рынок 10 новых типов МЭМС может дополнительно увеличить рынок МЭМС на 100 млн долл. [2] в 2017 г., но реально это не меняет общий объем рынка (порядка 20 млрд долл.). Поэтому большой интерес вызвало появление дорожной карты роста рынка МЭМС за 25 лет до 1 трлн долл. [3]. Предпосылками ее появления были тенденции в развитии техники вообще и МЭМС, в частности, в последние годы. Прежде всего отметим развитие так называемой сенсорной революции [4].

После огромного прогресса в области обработки информации и ее передачи возникает вопрос об источниках самой информации и, прежде всего, непосредственно из окружающего мира. Эту информацию могут дать разнообразные МЭМС-сенсоры. Прежде всего это означает возможность реального мониторинга окружающей среды, состояния здоровья человека, состояния различных технических средств и сооружений и т. д., а также возможность коррекции с помощью МЭМС-актюаторов. Существенное значение при этом имела возможность объединения сенсоров в различные сети, которые позволяют интегрировать полученную информацию.

Дополнительным фактором служит возможность использования беспроводных систем (БПС). БПС позволяют увеличить мобильность и доступность для источников и потребителей информации. Это способствует применению сенсоров в различных типах техники. Применение различных МЭМС в смартфонах и мобильных телефонах позволяет существенно расширить их функциональные возможности. Расширение функций мобильного телефона было отражено на рисунке [2] жизненного цикла комплектующих мобильного телефона.

Наиболее существенным является введение в последнее время в мобильные устройства различных медицинских МЭМС. Считают, что к 2015 г. включать такие МЭМС будут 30 % смартфонов, а к 2020 г. — практически все. В [3] был принят такой расчет: 7 млрд мобильных устройств могут содержать по 14 медицинских МЭМС, т. е. 100 млрд шт. При средней цене 10 долл/шт. это дает 1 трлн долл. Но опыт показывает, что цена 10 долл/шт. слишком велика для массовых МЭМС. Инерциальные МЭМС получили распространение только при снижении цены — меньше 5 долл./шт.

Поэтому несмотря на миллиардные объемы продаж мобильных телефонов и смартфонов доля сенсоров в их цене составляет только небольшую часть (порядка процента), поэтому уже используемые сенсорные системы не могут обеспечить рынок порядка триллиона долларов. Необходимы более масштабные проекты. В [3] рассмотрено несколько примеров таких глобальных проектных предложений. Они имеют некоторые общие черты:

- цена сенсора определена в 1 долл., следовательно, за 1 трлн долл. нужно продать 1 трлн шт.;
- число человек-пользователей принимается равным числу пользователей Интернетом (7 млрд в 2017 г.);

• при 1 трлн сенсоров это означает, что на человека приходится приблизительно 150 сенсоров.

Наиболее воспринимаемыми оказались два из таких глобальных проектов. Прежде всего, это проект фирмы HP: "Центральная нервная система Земли" — "Central Nervous System for the Earth" (CeNSE) — миллиарды различных датчиков должны осуществлять мониторинг состояния земной поверхности и атмосферы в целях предупреждения о возможных глобальных катастрофах или изменениях. Они должны, кроме того, обеспечить функционирование инфраструктуры населенных пунктов, транспортные сети, комфортные условия жилья ("умный дом") и т. д.

Естественно, что все эти сенсоры должны быть связаны в сети различного уровня. Эту задачу может решить всеобщий Интернет (Pervasive Internet). При этом уже привычный "Интернет для людей" (Internet of People) дополняется "Интернетом для вещей" (Internet of Things). Последний должен обеспечить контакт между человеком и машиной и между машинами. Это в 1000 раз увеличит объем сообщений Интернета и, соответственно, объемы финансирования его функционирования и устройств сопряжения с ним. В [5] рассмотрено более 50 примеров возможных приложений "Интернета для вещей". Ожидается, что к 2020 г. будет 50 млрд таких "пользователей". При 1 трлн сенсоров на долю одного такого пользователя придется около 20 сенсоров, что, в общем, совпадает с цифрами оснащенности сенсорами отдельных типов техники.

Возможности роста рынка МЭМС до 1 трлн долл. в обозримом будущем, конечно, вызвали необходимость обсудить проблемы, связанные с ней. Этой теме был посвящен 10-й Технологический симпозиум MEPTEC (Micro Electronics Packaging and Test Engineering Council) [6], на котором выступили представители ведущих фирм электроники.

> Слияние (fusion) вычислительной и коммуникационной техники и сенсорики можно считать наступлением эры третьей индустриальной революции. Этот процесс сопровождается значительным ростом объема производства и рынка МЭМС. Например, в 2010 г. было выпущено 168 млн шт. беспроводных сенсоров, а к 2015 г. ожидается их рост до 1,1 млрд шт. (K. Pister, UC Berkeley).

> В целом, поддерживая необходимость ускорения развития МЭМС, возникает сомнение о возможности достижения рубежа 1 трлн долл. в столь короткое время. По оценке J.-Ch. Eloy (Yole Developpement) для достижения уровня в 1 трлн долл. за 10 лет рынок должен расти с темпом 54 % в год, что существенно больше





МЭМС в мобильных телефонах в 2012 г.

реально существующих темпов роста (в среднем 10 %), хотя по отдельным типам МЭМС и в отдельные годы цифры могут быть значительно выше.

Эти проблемы более детально были рассмотрены на первом МЭМС Бизнес-форуме [7], который можно рассматривать как продолжение дискуссии по возможности роста МЭМС до 1 трлн долл. [6]. Например, рост микрофонов в 2011 г. составлял 63 %, общий рост рынка МЭМС — 29 %, но в 2015 г. он должен снизиться до 10 % (J. Bouchard, HIS) [7]. Вместе с тем, оценка рынка проводилась для массового производства. Триллион долларов должен обеспечить выпуск триллиона МЭМС, т. е. по цене порядка 1 долл. Одновременно должен расти рынок МЭМС высокого уровня. Требования к барометрическому сенсору гораздо выше, чем для автомобильного сенсора давления, следовательно, и цена выше (F. Melzer, Bosch) [7]. Сенсор для газовых турбин должен работать при температуре 600 °С и может способствовать увеличению эффективности работы турбины на 1...2 %, что дает дополнительно несколько десятков ГВт · ч/год. При этом цена такого беспроводного МЭМС может составлять десятки тысяч долларов (Al. Pisano, US Berkeley) [7].

В определенной мере итог обсуждения подвел К. Peterson (КР-МЕМЅ) — ветеран становления МСТ и МЭМС. В настоящее время рынок МЭМС составляет 3,5 % от рынка полупроводников, но в 1986 г. он составлял 1 %. Уровень в 1 трлн долл. означает необходимость роста рынка МЭМС в 100 раз. В полупроводниковой промышленности для роста в 100 раз потребовалось 35 лет. МЭМС может пройти этот путь за более короткий период — порядка 25 лет, если будут осуществляться такие глобальные проекты, как GeNSE и Internet of Things.

Следует отметить, что, по существу, осуществление подобных проектов определяет только объем суммарных расходов на их осуществление. Темп развития рынка определяется необходимой суммой потребностей на осуществление, развитие и поддержание таких или других проектов в год. Поэтому проведенные выше различные оценки и выкладки следует рассматривать как качественное доказательство возможности и необходимости ускоренного производства и выхода на рынок различных типов МЭМС.

Быстрому развитию рынка МЭМС препятствуют большие сроки проведения НИОКР и выхода на рынок. В таблице [3] воспроизведены данные R. Grace (MEMS Technologies Summit, Oct. 2010, S.U.). Из этой таблицы делается вывод, что реальный выход на рынок в ближайшие 10 лет следует ожидать только для МЭМС, уже проявивших себя на рынке.

Главным тормозом ускоренного развития МЭМС считают отсутствие стандартизации в проектировании и технологии МЭМС. До сих пор сохраняется принцип производства МЭМС: "один продукт — один процесс — один корпус — одна ASIC — одна тестовая система". Именно стандартизация процессов способствовала быстрому прогрессу ИС, который нашел свое отражение в законе Мура. Хотя давно известны попытки стандартизации технологических процессов МЭМС (Summit V, MEME, MUMPS, Si—Ge IMEC), но большинство фирм разрабатывает свои процессы.

В этом случае важно распространять их на разные типы МЭМС, как это делает фирма ST Microelectronics, которая свою технологию Thelma использует для производства акселерометров, гироскопов, датчиков давления, микрофонов и микрофлюидных МЭМС. Определенное значение имеет перенос разработанных МЭМС-технологий (Бош-процесс, корпусирование на пластине и т. д.) в технологию ИС. Это позволяет получить стандартизированные процессы и оборудование, которые на новом уровне могут быть использованы для МЭМС.

В Европе принята трехлетняя программа стандартизации проектирования МЭМС, которая координируется ST Microelectronics. Дальнейшему ускорению может способствовать также сознательно ограниченный выбор, например в качестве основных

Изделие	Исследования	Освоение изделия	Снижение цены	Полная коммерциализация	Время в годах
Сенсоры давления Акселерометры Газовые сенсоры Клапаны Спрейеры Фотоника/Дисплеи Био/химические сенсоры РЧ МЭМС Сенсоры скорости Микрореле	1954—1960 1974—1985 1986—1994 1980—1988 1972—1984 1980—1986 1980—1994 1994—1998 1982—1990 1977—1993	1960-1975 $1985-1990$ $1994-1998$ $1988-1996$ $1984-1990$ $1986-1998$ $1994-2000$ $1998-2001$ $1999-1996$ $1993-1998$	1975—1990 1990—1998 1998—2005 1996—2002 1990—2002 1998—2005 2000—2012 2001—2008 1996—2006 1998—2012	1990 1998 2005 2002 2002 2005 2012 2008 2006 2012	36 24 29 22 24 25 30 13 22 32
Резонаторы	1965—1980	1980—1995	1995—2011	2011	46
	1900 1900	1700 1775	1995 2011	Среднее	28
				_	30

Время коммерциализации для МЭМС/МСТ

типов МЭМС – беспроводных МЭМС, а сборку – на основе технологии "система в корпусе".

Следует отметить, что увеличение роста рынка МЭМС до 1 трлн будет способствовать увеличению числа рабочих мест. По оценке [3] это приведет к прямому увеличению рабочих мест на 2 млн и косвенно еще на 4 млн рабочих мест. Роль компонентной базы была продемонстрирована на примере iPhone [3]:

- 3 % (14 долл.) сборка (Китай);
- 32 % (178 долл.) компоненты (мировой рынок);
- 65 % (368 долл.) Аррle (США). Итого 100 % (560 долл.) — продажная цена.

Приведенное обсуждение было направлено, прежде всего, не на рост рынка МЭМС, а на неизбежное ускорение этого роста, связанного с развитием третьей индустриальной революции, основанной на слиянии вычислительной и коммуникационной техники с сенсорной, для обеспечения творческих возможностей людей. Косвенно это должно привести к выравниванию объемов рынка ИС и МЭМС (V. Ullal, Maxim) [3].

Указанная тенденция нашла отражение в названии и содержании конференции ConFab [8], которая отметила развитие общества в направлении к "Умному обществу" (лучше все же использовать англоязычный вариант "Smart Society"), именно за счет слияния вычислительной и коммуникационной техники с сенсорной.

Предыдущая вторая индустриальная революция характеризовалась дальнейшим увеличением пролуктивности за счет использования транзисторов. компьютеров, Интернета и привела к росту рынка полупроводников до 300 млрд долл.

Вклад России в развитие второй индустриальной революции был небольшим. Поэтому особенно острым становится вопрос о вкладе России в третью индустриальную революцию как о последнем шансе ее участия в формировании промышленной основы современного общества.

Список литературы

URL: http://www.yole.fr.
 10 MEMS applications will top \$100 million in 2017; thank mobile devices. URL: http://www.electroiq.com/articles/stm/ 2012/05/10-mems-applications-top-100-million-in-2017.html.
 Bryzek J. Roadmap to a \$Trillion MEMS Market // MEMS Journal Annal Update // memsjournal.ccsend.com/.
 Sensorization: the third automation revolution. URL: http://www.dieens.tudelff.pl

http://www.disens.tudelft.nl. 5. **Top** 50 "internet of things" applications. URL: http://www. electroiq.com/articles/sst/2012/05/top-50-internet-of-thingsapplications.html.

6. MEMS Symposium Report: Chasing 1 Trillion. URL:

http://www.electroiq.com/articles/sst/2012/05/mems-symposium-report-chasing-1-trillion.html. 7. **Conference** report: MEMS Business Forum. URL: http://www.electroiq.com/articles/sst/2012/05/conferencereport-mems-business-forum.html.

8. Semiconductors in the smart society: Next-generation connectivity @ The ConFab. URL: http://www.electroiq.com/articles/ stm/2012/06/semiconductors-in-the-smart-society-confab.html.

Ч_{анотехнологии} И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 621.315.61

А. И. Воробьева, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., Б. Г. Шулицкий, ст. науч. сотр., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск,

Республика Беларусь, e-mail: vorobjova@bsuir.by ФОРМИРОВАНИЕ МАССИВОВ **ΥΓΛΕΡΟΔΗΜΙΧ ΤΡΥΕΟΚ** НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОДАХ

С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРИСТОГО

ОКСИДА АЛЮМИНИЯ¹

Поступила в редакцию 25.05.2012

Рассматривается процесс формирования массивов вертикально ориентированных углеродных трубок, локализованных на металлических электродах с использованием тонкого пористого анодного оксида алюминия на различных функциональных подложках.

Синтез массивов углеродных трубок осуществляли методом химического осаждения углеводородов из парогазовой фазы.

Ключевые слова: углеродные трубки, пористый оксид алюминия, наноразмерные структуры, электрохимические процессы

Введение

Пористый анодный оксид алюминия (ПАО Al) имеет однородную пористую структуру с гексагональной упаковкой цилиндрических каналов и узким распределением пор по размерам. Комбинация уникальной пористой структуры (однонаправленные поры управляемого диаметра) с высокой температурной, механической и химической стабильностью делает пленки ПАО АІ привлекательными для синтеза различных наноматериалов и

¹ Работа выполнена в рамках ГПНИ "Конвергенция" РБ, задание № 3.2.02.

наноразмерных структур с использованием углеродных нанотрубок (УНТ) [1-5].

Однако до сих пор новые материалы и устройства на основе УНТ не получили широкого распространения, что связано с высокой стоимостью и низкой производительностью существующих методов получения УНТ в макроскопических количествах и с проблемой получения надежных, соответствующих размерам и свойствам УНТ электродных систем [6]. Как правило, наноустройства содержат в качестве наноэлементов единичные углеродные нанотрубки при прочих элементах схемы, в частности электродных системах, микрометровых размеров. В устройствах на массивах УНТ электроды могут иметь обычные для микроэлементов размеры.

В ряде работ предлагается выращивать однонаправленные вертикально ориентированные массивы УНТ методами химического осаждения из парогазовой фазы (*CVD* — *chemical vapor deposition*) или плазмохимического осаждения из парогазовой фазы (*PECVD* — *plasma enhanced chemical vapor deposition*), используя шаблон из пористого оксида алюминия (ПАО А1) [7—9].

В данной статье рассматривается процесс формирования массивов вертикально ориентированных углеродных нанотрубок, локализованных на металлических электродах с использованием тонкого пористого анодного оксида алюминия на различных функциональных подложках.

Методика эксперимента

Массивы вертикально ориентированных углеродных нанотрубок с упорядоченной структурой формировали с использованием пористого анодного оксида алюминия (ПАО A1) в качестве матрицы (темплаты — *template*) методом *CVD*-осаждения.

Так как для синтеза массивов углеродных трубок использовали метод химического осаждения углеводородов из парогазовой среды — *CVD*-процесс, основанный на термическом разложении углеродосодержащих газов на поверхности металлического катализатора при температуре 850...870 °С, электродная система должна быть достаточно термостойкой. Поэтому для формирования электродов использовали тонкие пленки Ti.

Экспериментальные образцы представляли собой двухслойные тонкопленочные композиции (Ti—Al): пленка титана толщиной (200...250) нм — для формирования нижнего электрода и пленка алюминия толщиной (1500...2000) нм — для формирования пористой матрицы методом анодного окисления. Поликристаллические пленки Al и Ti осаждали на стандартные ($6,0 \times 4,8$ см) ситалловые или Si/SiO₂ (диаметр 76 мм) подложки электронно-лучевым распылением в едином вакуумном цикле на установке 01HЭ-7-004 (Оратория-9). Вакуум при распылении Ti составлял 5,0 · 10⁻⁴ Па, темпера-

тура подложки — 573 К, скорость осаждения — (2,0 \pm 0,2) нм/с. Пленки Аl осаждали в вакууме 1,4 \cdot 10⁻⁴ Па при температуре 423 К со скоростью (5,0 \pm 0,5) нм/с. Толщину и скорость осаждения пленок контролировали кварцевым датчиком.

После осаждения проводили медленное охлаждение подложек до температуры 60...80 °С для предотвращения межзеренного окисления. Такой режим позволяет получать блестящие поликристаллические пленки с размером зерен порядка толщины слоев.

Процесс пористого анодирования слоя алюминия проводили двухстадийным методом [10, 11] в 4 %-ном водном растворе щавелевой кислоты (H₂C₂O₄) в потенциостатическом режиме при напряжении 40 В и температуре электролита 8 °С. Сразу же после анодирования алюминия проводили "утонение" барьерного слоя на дне пор при постепенном снижении потенциала с постоянной скоростью 0.5 мВ/с до 20 В. Когда потенциал достигает этого значения, толщина барьерного оксида становится близкой к 20 нм. Этот процесс происходит при неравновесных условиях. Скорость образования оксида в этих условиях ограничивается током анодирования. Отношение скорости растворения к скорости образования оксида выше, чем для анодирования при постоянном потенциале ячейки.

В связи с присутствием пленки титана, контактирующей с барьерным слоем плотного оксида алюминия в донной части пор, дальнейшее уменьшение потенциала анодирования может вызвать образование плотной пленки оксида титана [12]. Продолжение электрохимического процесса приведет к растворению оставшегося барьерного слоя оксида алюминия, зарождению островков оксида титана, полному превращению алюминия в оксид, росту оксида титана в вертикальном и латеральном направлениях и образованию сплошной тонкой пленки плотного оксида титана [12], поэтому сразу же после достижения напряжения 20 В процесс "утонения" прекращали.

В процессе "утонения" происходит не только уменьшение толщины барьерного слоя, но и изменение морфологии поверхности барьерного слоя на границе раздела оксид—титан [13]. Поры расширяются у фронта анодирования, так как равновесное число пор на квадратный сантиметр обратно пропорционально квадрату потенциала анодирования [14, 15].

Остатки барьерного слоя удаляют непосредственно перед осаждением никеля катодным растворением в электролите осаждения никеля при напряжении (-3,0...4,0) В в течение 3...5 мин, как описано в работах [16, 17].

В результате, полученная матрица со сквозными каналами имела следующие параметры: высота ПОА — 0,5 мкм, диаметр пор 40...50 нм, шаг матрицы 100...130 нм.

Расщепление пор в слое между упорядоченной структурой Al_2O_3 и пленкой титана и перфорация границы раздела после катодного растворения приводит к образованию множества центров зародышеобразования в каждой поре в начале процесса электроосаждения никеля. Это способствует более однородному осаждению металла и приводит к увеличению площади границы раздела титан — никель (площадь контакта).

Осаждение никеля в полученную матрицу проводили в двухэлектродной ячейке с графитовым противоэлектродом при напряжении — 2,2 В в течение 3 мин при комнатной температуре в электролите следующего состава (в г/л): NiSO₄ · 7H₂O (140—200); NiCl₂ · 6H₂O (30—40); H₃BO₃ (25—40); Na₂SO₄ (60—80), pH = 5,2.

Описанная процедура приводит к локальному формированию нанокластеров никеля на дне пор оксида. Степень дисперсности каталитического слоя (никеля) в данном случае определяется не только толщиной пленки осажденного металла $h_{\rm Ni} \approx 30$ нм, но и свойствами пористого оксида. Наличие стенок пор препятствует спеканию частиц металла, окруженных оксидом, в процессе высокотемпературного отжига. Из пленки никеля такой же толщины, осажденной на планарную поверхность, при температуре синтеза углеродных трубок (УТ) образуются более крупные частицы размером более 100 нм.

Управление параметрами процессов анодирования и электрохимического осаждения осуществляли с использованием потенциостата П-5827. Регистрацию и мониторинг *in situ* электрических параметров этих процессов проводили с помощью специально разработанной лабораторной установки, соединенной с персональным компьютером.

Синтез УТ осуществляли инжекционным CVDметодом путем высокотемпературного пиролиза жидкого углеводорода — ксилола [C₈H₁₀] в смеси с летучим источником катализатора — ферроценом $[Fe(C_5H_5)_2]$. Процесс проводили при атмосферном давлении с использованием аргона в качестве газаносителя. Образцы из ПОА с кластерами никеля на дне пор помещали в трубчатый реактор из кварца специально созданного для этих целей оборудования [18]. Концентрация ферроцена в смеси с ксилолом составляла 1,0 %, скорость инжекции реакционной смеси в зону реактора — 1 мл \cdot мин⁻¹, температура — 850 °C, скорость потока аргона — 100 см³ · мин⁻¹, скорость потока $NH_3 - 10$ см³/мин. Время синтеза составляло 30...60 с, а скорость охлаждения определялась процессом естественного остывания нагревательного устройства.

В результате был сформирован композитный углеродный материал, состоящий из массива УТ, встроенных в пористый оксид алюминия на контактных электродах из Ті. Последующий термический отжиг в присутствии переходного металла (ни-

келя) при температуре 350 °С в течение 60 мин способствовал улучшению электрического контакта между трубками и металлическим электродом (Ti).

После синтеза УТ проводится ионная очистка поверхности образца бомбардировкой ионами аргона с энергией 3 кэВ. При ионном травлении материал матрицы — анодный оксид алюминия распыляется быстрее, чем материал трубок, поэтому трубки на РЭМ-фотографиях выступают над поверхностью матрицы ПОА.

При химическом травлении материал матрицы удаляли лишь в концентрированной плавиковой кислоте или в 20 %-ном водном растворе NaOH. После химической очистки образцы промывали в дистиллированной воде до pH = 6...7.

Морфологию поверхности и поперечных сколов образцов, химический состав и структуру полученного материала и выделенных из него углеродных трубок, а также изменения в структуре самой матрицы ПОА в процессе высокотемпературного отжига исследовали с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ — Philips XL 30 S FEG и Hitachi S-4800), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ — Philips CM-30), ИКспектроскопии (Perkin-Elmer Spectrum One), спектроскопии комбинационного рассеяния (КР- твердотельный лазер Nicolet Spectrometer "NECSUS 720" с длиной волны λ = 1064 нм и мощностью 0,1...3 Вт) и сканирующей зондовой микроскопии (Nanotop NT-206, "Микротестмашины", Беларусь). Измерения выполняли в контактном режиме в атмосферных условиях с использованием кремниевых кантилеверов CSC12/15. Получали АСМ-изображения обеих поверхностей образцов: свободной поверхности и поверхности "к подложке".

Компьютерную обработку экспериментальных данных проводили с помощью программы для обработки, визуализации и анализа ACM-данных "SurfaceXplorer".

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены РЭМ-фотография и профили поверхности фрагментов проводящего слоя Ті с островками электрохимически осажденного никеля после селективного травления оксида алюминия. Различные уровни серого обусловлены разновысотностью заполнения пор никелем: светлосерый цвет — ближе к внешней поверхности образца, темно-серый — ближе к внутренней поверхности матрицы. Это связано с неоднородной морфологией поверхности барьерного слоя на границе раздела оксид — титан в результате утонения.

Размер светлых участков (точек) соответствует размеру частичек катализатора (никеля) и составляет в среднем 28 нм (25...35 нм). Более темные участки вокруг островков никеля соответствуют слою титана под донной частью пор оксида алюминия после снижения напряжения формовки до



Рис. 1. РЭМ-фотография и профили поверхности различных фрагментов проводящего слоя Ті с островками электрохимически осажденного никеля после селективного травления оксида алюминия

20 В. Размер этих областей близок к размеру пор стравленного оксида алюминия после расширения их у фронта анодирования при утонении. Возможно эти области соответствуют очень тонкому слою островков плотного оксида титана, который образуется по механизму, описанному в работе [12], в донной части пор. Остальное темное поле — это слой титана.

На рис. 2 показаны РЭМ-изображения поверхности образцов, полученных в течение 40 с синтеза при 870 °С в 1 %-ной смеси ферроцен — ксилол. Характер топографии поверхности этих образцов представлен на рис. 3, 4.

На рис. 2, δ условная граница (штриховая линия) разделяет две области образца с разной степенью заполнения матрицы углеродными трубками. В каждой области выделены участки (квадраты размером ~1 × 1 мкм), отличающиеся отсутствием (участок 1) и наличием (участок 2) стационарного катализатора (никеля). Все остальные условия синтеза композитного материала идентичны.

Ниже, в таблице приведены параметры массива УТ, встроенных в ПОА, и степень заполнения оксида трубками на разных участках образца.

Из рисунков и таблицы видно, что в матрице из пористого оксида алюминия образуется массив упорядоченных УТ с высокой степенью однородности геометрических размеров, не превышающей 30 %. Более узкое, с разбросом не более 10 %, распределение



Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности двух образцов, полученных в течение 40 с синтеза (*a*) и 90 с синтеза (*б*) при 870 °С в 1 %-ной смеси ферроцен — ксилол. Условная граница (штриховая линия) на рис. 2, *б* разделяет две области образца с разной степенью заполнения матрицы УТ, отличающиеся отсутствием (участок 1) и наличием (участок 2) стационарного катализатора (никеля)

Параметры массива углеродных трубок, встроенных в ПОА

Параметр	Участок		
Параметр	1 (Fe)	2 (Ni + Fe)	
Степень заполнения пор, $\%$ Внешний диаметр трубок d , нм Внутренний диаметр трубок d_0 , нм Расстояние между трубками D , нм Аспектное отношение	1015 4050 2030 100130 1012	7085 4050 1520 100130 1020	

трубок по размерам в нанометровом диапазоне — пока еще трудно достижимая задача. Основной параметр (внешний диаметр трубок), определяемый свойствами матрицы, а не условиями проведения синтеза, имеет разброс порядка 20 %.

Степень упорядоченности и однородности геометрических размеров массива УТ зависит от однородности геометрических размеров носителя, т. е. от толщины ПОА и режимов его формирования.

В данном временном интервале синтеза и данной толщине матрицы нанотрубки заполняют пору по высоте полностью или незначительно выходят наружу за ее пределы. Анализ областей с никелевым катализатором и без него, показывает, что присутствие Ni увеличивает степень заполнения матрицы углеродными трубками.

Наличие катализатора считается необходимым условием для формирования углеродных нанотрубок (УНТ). Роль катализатора сводится к адсорбции исходного углеродсодержащего соединения на поверхности частицы катализатора, диссоциации этого соединения, растворению углерода в объеме частицы катализатора и последующем выделении растворенного углерода с образованием однослойных, многослойных нанотрубок или нановолокон. [19]. Действие того или иного механизма роста углеродных структур (нанонитей, нанотрубок или других образований) определяется многими факторами, среди которых главенствующее значение помимо внешних условий (температура, общее и парциальное давление, состав исходного соединения и др.) имеют размер и состав частиц катализатора, характер взаимодействия катализатора с носителем или подложкой [19].

Предлагаются разные механизмы роста УНТ, в том числе в порах нанометрового размера 5...10 нм на частицах катализатора размером 1...5 нм [20], и пока трудно себе представить механизм роста нанотрубки на частицах катализатора большего размера. Можно предположить, что в данном конкретном случае (в пористом оксиде алюминия) условия для синтеза УНТ сходны с условиями синтеза в одномерном нанореакторе (в каждой поре оксида алюминия) и сам оксид принимает участие в этом процессе [21].

В полученных образцах размер углеродных трубок близок к размеру пор оксида алюминия. При отсутствии стационарного катализатора (участок 1 на рис. 2) углеродные трубки могут расти за счет летучего катализатора (железа). При пиролизе ферроцена образуются мелкодисперсные частицы железа. Имея незначительные размеры, частицы находятся во взвешенном состоянии и проникают не во все поры ПОА, поэтому степень заполнения пор на этом участке мала.

На участках с кластерами никеля на дне пор (участок 2) УТ формируются при термическом разложении молекул ксилола $C_6H_4(CH_3)_2$ и ферроцена (C_5H_5)₂Fe на внутренней поверхности пор оксида алюминия, нагретой до температуры 850...875 °C. При этой температуре достигающие



Рис. 3. Характер топографии поверхности образца, полученного в течение 40 с при 870 °С в 1 %-ной смеси ферроцен — ксилол



Рис. 4. Характер топографии поверхности образца, полученного в течение 60 с при 870 °С в 1 %-ной смеси ферроцен — ксилол

поверхности молекулы углеводородов распадаются до атомов, водород десорбируется, а атомы углерода мигрируют вдоль поверхности и объединяются в растущие графитовые островки, постепенно закрывающие внутреннюю поверхность поры. Так как решетки γ -Al₂O₃ и пленки графита (графена) сушественно отличаются по значению постоянных решеток (0,79 и 0,25 соответственно), трудно предположить, что ориентация пленки графита задается атомной структурой поверхности оксида на стенках пор. Скорее всего, зарождение пленки (островков) графита происходит на шероховатой поверхности пор, которая способствует эффективной фиксации атомов углерода. Образуются трубки со стенками из одноатомных лоскутков графита (графена). В отечественной и зарубежной литературе такие трубки называют многослойными углеродными нанотрубками (МУНТ) со структурой типа "папье-маше" [22—24].

К сожалению, результаты ПЭМнаблюдений боковых сечений выделенных трубок не позволили однозначно интерпретировать структуру стенок полученных углеродных трубок. Это связано с тем, что получить электронно-микроскопические изображения торцевых срезов МУНТ достаточно сложно, а изображения боковых сечений допускают различные толкования.

Исследования с помощью КРспектроскопии показали, что в спектре присутствует полоса в области 1595 см⁻¹, соответствующая дважды вырожденным деформационным колебаниям элемента графеновой структуры и полоса в области 1360 см⁻¹ ¹. coответствующая вибрационным состояниям разрушенной гексагональной решетки вблизи границ углеродных кристаллитов. Наличие двух пиков на данных частотах с сопоставимой интенсивностью характерно для графитизированных материалов, состоящих из разупорядоченных углеродных нанокристаллитов [25], углеродных нановолокон [26] или углеродных нанотрубок с высокой степенью дефектности графеновых стенок.

Заключение

Представлен процесс формирования массивов вертикально ориентированных углеродных трубок, локализованных на металлических электродах с использованием тонкого пористого анодного оксида алюминия на различных функциональных подложках.

Достоинствами разработанного процесса являются: технологичность; широкий диапазон управления параметрами синтезируемых

структур: возможность задавать диаметр трубок при формировании матрицы из пористого оксида алюминия в диапазоне 30...100 нм, используя различные режимы и электролиты анодирования. Кроме того, разработанный процесс может осуществляться с использованием традиционных для полупроводниковой технологии операций.

Полученный композитный материал, представляющий собой встроенные в пористый оксид алюминия массивы вертикально ориентированных углеродных трубок, локализованных на металлических электродах, имеет высокую сорбционную способность, химическую и механическую стойкость. Это позволит создавать микрочипы, например электродных биосенсоров, обеспечивающие прямые электрические измерения с использованием наноразмерных чувствительных элементов (электродов) фарадеевского и нефарадеевского типов [27-29]. Такие измерительные модули уже изготовляются на основе нанопористого оксида алюминия, однако их использование сопряжено с рядом трудностей, в частности, с обеспечением условий ламинарного течения инокулированной питательной среды вдоль измерительных электродов емкостных датчиков в этих модулях, а также их стерилизацией [30]. Предполагается, что углеродные трубки, заполняющие каналы в ПОА, обеспечат не только защиту внутренней поверхности электродов при многократном использовании, но и позволят максимизировать информационный сигнал, увеличить чувствительность и уменьшить объем тестируемого образца.

Углеродная оболочка внутри каждой поры защищает оксид от растворения и взаимодействия с химическими реактивами, сохраняя его специфические свойства. Она также обеспечивает биосовместимость и стабильность во многих органических и неорганических средах и, кроме того, препятствует поглощению влаги из атмосферы, что характерно для обычного пористого оксида алюминия. Такие углеродные матрицы, обладающие значительным сопротивлением к электрохимической коррозии, устойчивы также к радиации в агрессивных средах. Это позволит использовать данный материал при изготовлении различных наноразмерных элементов с использованием традиционных для полупроводниковой технологии операций на различных функциональных подложках [31-34].

Список литературы

1. Masuda H., Fukuda K. Ordered Metal Nanohole Arrays Made by a Two-Step Replication of Honeycomb Structures of Anodic Alumina // Science. 1995. N 268 (9). P. 1466–1468. 2. Che G., Lakshmi B. B., Martin C. R., Fisher E. R., Puoff P. A. Chemical Vener Deced Surthesis of Carbara

Ruoff R. A. Chemical Vapor Deposition Based Synthesis of Carbon Nanotubules and Nanofibers Using a Template Method // Chem. Mater. 1998. N 10. P. 260-267.

3. Shingubara S. Fabrication of nanomaterials using porous alumina templates // Journal of Nanoparticle Research. 2003. V. 5. P. 17-30.

4. Красильникова О. К., Погосян А. С., Серебрякова Н. В., Гранкина Т. Ю., Ходан А. Н. Получение углеродных наноматериалов с использованием пористого оксида алюминия как темплата // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2008. Т. 44, № 4. Р. 389—394.

5. Poinern G., Jai E., Nurshahidah A., Derek F. Progress in Nano-Engineered Anodic Aluminum Oxide Membrane Development. // Materials. 2011. V. 4, N 3. P. 487–526.

6. Воробьева А. И. Электродные системы и методы их из-готовления // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 3. C. 243–253

7. Zhang X. Y., Zhang L. D., Zheng G. H., Zhao L. X. Template synthesis of high-density carbon nanotube arrays // J. of Crystal Growth. 2001. V. 223. P. 306–310.

8. Miao J. Y., Cai Y., Chan Y. F., Sheng P., Wang N. A novel carbon nanotube structure formed in ultra-long nanochannels of anodic aluminum oxide templates // J. Phys. Chem. 2006. V. 110, N 5. P. 2080.

9. Yu K., Ruan G., Ben J., Zou J. Synthesis of carbon nanotubes within Pt nanoparticles-decorated AAO template / Mater. Lett. 2007. V. 61. P. 97–100.

10. Воробьева А. И., Уткина Е. А. Получение тонких пористых оксидов алюминия с регулярной упорядоченной структу-рой // Микроэлектроника. 2005. Т. 34, № 2. С. 125—134.

11. Воробьева А. И., Шулицкий Б. Г. Формирование матрицы из анодного оксида алюминия для осаждения углеродных нанотрубок // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 9. С. 39–43.

12. Белов А. Н. Формирование наноструктурированного оксида титана методом анодного окисления двухслойных структур алюминий-титан // Нанотехника. 2010. Т. 21, № 1. С. 78-81.

13. Mingliang Tian, Shengyong Xu, Jinguo Wang et. al. Penetrating the Oxide Barrier in Situ and Separating Freestanding Porous Anodic Alumina Films in One Step // Nano Lett. 2005. V. 5, N 4. P. 697–703.

14. **Tager A. A., Moskovits M., Xu J. M.** Spontaneous charge polarization in single-electron tunneling through coupled nanowires. // Phys. Rev. B. 1997. V. 55. № 7. P. 4530–4538.

15. Keller F., Hunter M. S. and Robinson D. L. Structural features of oxide coatings on aluminum. // J. Electrochem. Soc. 1953. V. 100. P. 411

16. Xiaowei Zhao, Seo Seok-Kyoo, Lee Ung-Ju, and Lee Kun-Hong. Controlled electrochemical dissolution of anodic aluminum Order Construction of Open-through pore structures // Journal of The Electrochemical Society. 2007. V. 154, N 10. P. C553—C557.
 17. Shaban M., Hamdy H., Shahin F., Park J. and Sang-Wan

Ryu. Uniform and Reproducible Barrier Layer Removal of Porous Anodic Alumina Membrane // J. Nanosci. Nanotechnol. 2010. V. 10, N 5. P. 3380-3384.

18. Labunov V. A., Shulitski B. G. Nonrestricted large area of vertically aligned carbon nanotubes // Труды III Российско-Японского семинара "Оборудование и технологии для производства компонентов твердотельной электроники и нано-материалов". МИСиС — ULVAC Inc., Москва. 2005. С. 260. 19. Чесноков В. В., Буянов Р. А. Особенности механизма

образования углеродных нанонитей с различной кристаллической структурой из углеводородов на катализаторах, со-держащих металлы подгруппы железа // Мембраны. Серия "Критические технологии". 2005, № 4 (28). С. 75–79.

20. Pan Z. W., Chang B. H., Wang C. Y. et al. Very long carbon nanotubes. // Nature. 1998. V. 394. P. 631—632. 21. Басаев А. С., Шулицкий Б. Г., Воробьева А. И. и др.

Нанокомпозитный углеродный материал с упорядоченной структурой, синтезированный с использованием пористого оксида алюминия // Российские нанотехнологии. 2011. Т. 6, № 3–4. C. 8–15.

22. Feng S. Q., Yu D. P., Hu G., Zhang X. F., Zhang Z. The HREM observation of cross-sectional structure of carbon nanotubes // J. Phys. Chem. Sol. 1997. V. 58. P. 1887–1892.

23. Berber S., Tománek D. Stability differences and conversion mechanism between nanotubes and scrolls. // Phys. Rev. B 2004. V. 69. P. 233-404.

24. Ткачев А. Г., Золотухин И. В. Аппаратура и методы синтеза углеродных наноструктур. М.: Машиностроение-1, 2007. 316 c.

25. Персианцева Н. М., Поповичева О. Б., Старик А. М. и др. О гидрофильности сажевых частиц, образующихся в камере сгорания реактивного двигателя // Письма в ЖТФ. 2000. T. 26 (18). C. 50-56.

26. Апресян Л. А., Власов Д. В., Власова Т. В. и др. Реактор с активированным водородом для синтеза углеродных нанотрубок // ЖТФ. 2006. Т. 76 (12). С. 140-142.

27. Yang L. et al. Electrical/electrochemical impedance for

Tapid detection of foodborne pathogenic bacteria // Biotechnology Advances. 2008. V. 26, № 2. P. 135. 28. Lu F., Gu L., Meziani M. J. et al. Advances in Bioapplications of Carbon Nanotubes // Adv. Mater. 2009, N 21. P. 139–152.

29. Lee K., Kwon J. H., Moon S. L. et al. Sensor controls on the basis of carbon nanotubes to define of pH solution // Materials Letters. 2007. N 14–15. P. 3201–3203.

30. Драпеза А. И., Лобан В. А., Судник Ю. М. и др. Интегральные массивы емкостных сенсоров на основе нанопористого оксида алюминия для культуральных методов контроля микробио-логического загрязнения // Матер. межд. научной конф. "Медэлектроника — 2008". Минск, 11—12 декабря 2008 г. С. 75—80.

31. Крутоверцев С., Тарасова А., Чуприн М. и др. Сенсоры микровлажности технических газовых сред // Электроника. 2008. № 1. C. 72. 32. Milne W. I., Teo K. B. K., Amaratunga G. A. J. et al.

Carbon nanotubes as field emission sources // Journal of Materials Chemistry. 2004. V. 14. P. 933.

33. Wu X. B., Li J. T., Wu G. T. et. al. Hydrogen adsorption of open-tipped insufficiently graphitized multiwalled carbon nanotubes // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. P. 3389.

34. Hironori Orikasa, Nobuhiro Inokuma, Somlak Ittisanronnachai et al. Témplate synthesis of water-dispersible and magnetically responsive carbon nano test tubes // Chem. Commun. 2008. P. 2215–2217.

Моделирование и конструирование МНСТ

УДК 621.382.029.6.001.63; 535.37

К. В. Малышев, канд. техн. наук, доц., Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, e-mail: malyshev@bmstu.ru

ТЕРАГЕРЦОВЫЙ КВАНТОВЫЙ КАСКАДНЫЙ ЛАЗЕР НА КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ СВЕРХРЕШЕТКАХ

Поступила в редакцию 02.06.2012

Предложено и теоретически исследовано применение квазипериодических AlGaAs-сверхрешеток в качестве активного элемента квантового каскадного лазера терагерцового диапазона. У сверхрешеток Фибоначчи, Тью-Морса и комбинированных сверхрешеток в электрических полях с напряженностью $F = 11...13 \ {\rm kB} \cdot {\rm cm}^{-1}$ в диапазоне частот f = 2...4 ТГц обнаружено многоцветное излучение. Триплеты коэффициента оптического усиления G линейно зависят от электрического поля и сохраняют высоту пиков более 20 см⁻¹. Такие лазеры на квазипериодических сверхрешетках перспективны для "терагерцовой технологии".

Ключевые слова: терагерцовая технология, квантовый каскадный лазер, квазипериодическая структура, последовательность Фибоначчи, последовательность Тью-Морса, сверхрешетка

Введение

Терагерцовые квантовые каскадные лазеры (ККЛ) все активнее применяют в разных областях науки и техники (см., напр., [1]). Основную роль в работе ККЛ играет электролюминесценция полупроводниковых сверхрешеток (СР). Развитие СР для активной области терагерцового ККЛ идет по двум основным направлениям, различающимся длиной сверхрешеток (см., напр., [2], а также [3]). В первом направлении применяют СР длиной менее 50 нм, содержащие 2-4 барьерных слоя. В них важны переходы электронов между малым числом резонансных энергетических уровней и основную роль играет резонансное рассеяние электронов на продольных оптических фононах (resonant-LO-phonon design). Во втором направлении применяют СР длиной более 100 нм. В них важны переходы электронов между большим числом близко расположенных резонансных уровней (bound-to-continuum design).

Квазипериодические СР занимают широкую область между идеально упорядоченными и полно-

стью разупорядоченными структурами, поэтому отличаются большим разнообразием резонанснотуннельных свойств. Можно ожидать, что электролюминесцентные свойства терагерцовых ККЛ с ячейками активной области в виде квазипериодических СР также будут охватывать широкий диапазон ККЛ обоих основных направлений.

В инфракрасной фотонике такие надежды на квазипериодические решетки уже оправдались [4]. Оптические фибоначчиевые структуры оказались перспективными для создания многоцветных инфракрасных отражателей, у которых спектр отражения состоит из нескольких резонансных линий примерно одинаковой высоты. Известно также [5] сочетание активной области обычного терагерцового ККЛ с квазипериодической оптической СР, в которой по закону Фибоначчи меняется показатель преломления слоев оптического резонатора. К квазипериодическим оптическим структурам примыкают и лазеры без оптической резонаторной части, построенные на основе полностью разупорядоченных активных сред. В таких лазерах основную роль играет интерференция электромагнитных волн, рассеивающихся на случайно расположенных элементах активной среды. Характерный пространственный масштаб в подобных "фотонных квазикристаллах" равен длине электромагнитной волны и составляет примерно 500 нм. В отличие от таких оптических структур в данной работе предлагается выполнить в виде квазипериодической СР саму активную излучающую область ККЛ. Характерный пространственный масштаб в таких 'электронных квазикристаллах" равен длине волны де-Бройля электрона проводимости и составляет примерно 5 нм.

Таким образом, квазипериодические СР в качестве активного элемента ККЛ могут оказаться полезными при разработке терагерцовых многоцветных ККЛ, у которых спектры излучения состоят из нескольких резонансных линий сравнимой высоты. В таких ККЛ примерно одинаковые интенсивности излучения на нескольких частотах могли бы получаться не за счет оптических эффектов, а за счет инверсии заселенностей сразу на многих энергетических уровнях.

При разработке AlGaAs-CP для ККЛ надо подобрать такие параметры AlGaAs-слоев, которые обеспечивают значение коэффициента оптического усиления G(f) активной области, превышающее потери на поглощение в остальных слоях ККЛ. Обычно требуется G > 20 см⁻¹ в диапазоне частот f = 2...4 ТГц в умеренном электрическом поле порядка 10 кВ · см⁻¹.

Расчет коэффициента оптического усиления

Расчеты проводили в основном по методике, описанной в работе [6]. Эта методика комбинирует несколько способов расчета коэффициента оптического усиления ККЛ, описанных, напр., в работе [2]. В отличие от исходной методики [6] были сделаны следующие упрощения.

Мы пренебрегли изгибом дна зоны проводимости СР, вызванным легированием потенциальной ямы, которой заканчивается каждый период ККЛ (слоевая концентрация донорной примеси $3,6 \cdot 10^{-4}$ нм⁻²). Для эталонной структуры этот изгиб составлял менее 1 мэВ и оказывал пренебрежимо малое влияние на положение резонансных уровней и на соответствующие волновые функции (рис. 1).

Для расчета волновых функций вместо двухзонной модели, использующей в работе [6] псевдовалентную зону, применили однозонную модель. Такое пренебрежение влиянием валентных электронов на волновые функции электронов проводимости вполне в духе комбинированной методики [6]. Эта методика представляет скорость *W* переходов электрона между состояниями зоны проводимости с учетом всех механизмов рассеяния разбитой на два множителя: $W = K(E)|D|^2$, где D = $= \int dx \Psi_1(x) x \Psi_2(x)$ — матричный элемент величины x между состояниями Ψ_1 и Ψ_2 . Для феноменологического частотного множителя K(E) в работе [6] приведена сложная немонотонная зависимость от энергии Е перехода. Вместо нее мы применили простую монотонную кусочно-линейную зависимость (см. вставка на рис. 1), приводящую в результате к тем же графикам частотно-полевой зависимости коэффициента оптического усиления эталонной структуры, что и в работе [6].

Пренебрегли также и эффектами непараболичности зоны проводимости. Это пренебрежение согласуется с отбрасыванием состояний горячих



электронов, принятой в модели работы [6]. Отбрасываются те волновые функции, которые концентрируются на расстояниях больше длины свободного пробега 80 нм от наклонного дна потенциальной ямы. В характерном поле с напряженностью $F = 12 \text{ кB} \cdot \text{см}^{-1}$ такие состояния в местах своей наибольшей концентрации имеют резонансные уровни, располагающиеся выше барьеров.

Сами резонансные энергетические уровни и соответствующие им волновые функции определяли по заданному потенциальному профилю энергии поперек слоев СР с помощью традиционного метода матриц переноса, как описано в работе [8].

Уравнения для заселенностей резонансных уровней получали способом, описанным в работе [7].

В качестве эталонной структуры, а также для проверки правильности расчетных процедур, как и в работе [6], взята классическая трехъямная AlGaAs-структура [9] с резонансом на продольных оптических фононах. Толщины слоев (последовательность слева направо), начиная с инжекторного барьера равнялись 9, 17, 4, 13, 7, 29 монослоев GaAs (MC) по 0,565 нм. Полужирным курсивом здесь выделены барьерные слои, а подчеркиванием — легированный слой потенциальной ямы (слоевая концентрация донорной примеси $3,6 \cdot 10^{-4}$ нм⁻²).

На рис. 1 для эталонной структуры показан потенциальный профиль и распределение электронной плотности (квадрат модуля волновой функции электрона) в произвольных единицах на протяжении двух периодов эталонного ККЛ в характерном электрическом поле с напряженностью $F = 12 \text{ кB} \cdot \text{сm}^{-1}$. На рис. 1 E — энергия электрона; x — координата поперек слоев СР.

Оптическое усиление в квазипериодических сверхрешетках

При выборе параметров слоев квазипериодичес-

ких СР за основу брались средние параметры слоев эталонной структуры, приведенной в работе [9]. Основные принципы построения и разнообразные свойства квазипериодических полупроводниковых СР описаны в работе [10].

Каждый блок A и B, из которых строились CP, состоял из слоя $Al_{0,12}Ga_{0,88}$ As потенциального барьера высотой 0,15 эВ и толщиной 4...7 MC, за которым следовал слой потенциальной ямы GaAs толщиной 10...40 MC. Во всех CP последний слой потенциальной ямы легировался так же, как в эталонной структуре [9]. За этим слоем следовал слой потенциального барьера для инжекции электронов в следующий период ККЛ.





На рис. 2, а, б показаны частотные спектры коэффициента усиле-СР Фибоначчи G ния S_8 = BABBABABBABBABBABBABABABAB при толщине инжекторного барьера 7 МС и толщине ямы 34 МС в блоке А. Спектры на рис. 2, $a(2, \delta)$ получены при толщине барьеров 5 МС (6 МС) в обоих блоках А и В и при толщине ямы 17 МС (16 МС) в блоке В. На каждом спектре видны три пика выше порога 20 см^{-1} , причем два из них имеют почти одинаковую высоту.

На квазипериодических СР можно получить линейную зависимость коэффициента оптического усиления G(f, F) в широком диапазоне частот f и напряженности F электрического поля. Например, на рис. 3 показана такая зависимость для СР Тью-Морса $T_4 = BAABABBA$ при толщине инжекторного барьера 8 МС (B_1 на вставке рис. 3), толщине ямы 16 МС (34 МС) в блоке A(B) и толщине барьера 6 МС в обоих блоках Aи B. Видно, что средний пик триплета раздваивается при уменьшении Fниже 12 кВ · см⁻¹.

ККЛ, построенные на разнообразных комбинациях квазипериодических СР с "обычными" СР, также обладают полезными свойствами. Например, если скомбинировать СР Тью-Морса T_4 с эталонной структурой (*C* на вкладке рис. 4), то получим триплет, средний пик которого линейно сдвигается при изменении поля во всем диапазоне F = 11...13 кВ · см⁻¹ (рис. 4).

Заключение

Теоретически показано, что квазипериодические полупроводниковые AlGaAs-сверхрешетки пригодны в качестве активных областей квантового каскадного лазера терагерцового диапазона, построенного на резонансных продольных оптических фононах. Обнаружено многоцветное излучение с пиками коэффициента оптического усиления выше 20 см⁻¹ в диапазоне частот и полей, обычном для терагерцовых AlGaAs-лазеров. Многоцветное терагерцовое излучение сверхрешеток Фибоначчи, Тью-Морса и комбинированных сверхрешеток имеет вид трех пиков на частотах 2...4 ТГц, из которых два пика имеют одинаковую высоту. Пики сохраняют свою форму в электрических полях 11...13 кВ·см⁻¹ и линейно зависят от поля. Это открывает перспективы создания многоцветного терагерцового лазера на квазипериодических сверхрешетках для нужд бурно развивающейся "терагерцовой технологии".

Работа поддержана грантом РФФИ № 11-07-00007-а.

Список литературы

1. Rostami A., Rasooli H., Baghban H. Terahertz Technology. Fundamentals and Applications. New York: Springer, 2011. 245 p. 2. Rossi F. Theory of Semiconductor Quantum Devices. Microscopic Modeling and Simulation Strategies. New York: Springer, 2011. 380 p.

3. Кукушкин В. А. Частотноперестраиваемый безинверсный лазер дальнего инфракрасного и терагерцового диапазона на наногетероструктурах с квантовыми ямами // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 3. С. 7—14. 4. **Macia E.** Exploiting aperiodic designs in nanophotonic devices // Reports on Progress in Physics. 2012. V. 75, N 036502. P. 1–42.

5. Quasi-periodic distributed feedback laser / L. Mahler, A. Tredicucci, F. Beltram et. al. // Nature Photonics. 2010. V. 4, N 3. P. 165-169.

6. **Compact** model for the efficient simulation of the optical gain and transport properties in THz quantum-cascade lasers / L. Schrottke, M. Giehler, M. Wienold et al // Semiconductor Science and Technology. 2010. V. 25. N 4. P. 045025-1–045025-14.

7. Indjin D., Harrison P., Kelsall R. W., Ikonic Z. Self-consistent scattering theory of transport and output characteristics of quantum cascade lasers // Journal of Applied Physics. 2002. V. 91. N 11. P. 9019–9026.

8. **Cassan E.** On the reduction of direct tunneling leakage through ultrathin gate oxides by a one-dimensional Schrodinger—Poisson solver // Journal of Applied Physics. 2000. V. 87, N 11. P. 7931–7939.

9. **Terahertz** quantum-cascade lasers based on a three-well active module / H. Luo, S. R. Laframboise, Z. R. Wasilewski et al. // Applied Physics Letters. 2007. V. 90, N 4. P. 041112-1—041112-3.

10. **Macia E.** Aperiodic structures in condensed matter: fundamentals and applications. New York: CRC Press, 2009. 443 p.

УДК 621.38

А. Л. Деспотули, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., e-mail: despot@ipmt-hpm.ac.ru,

А. В. Андреева, д-р физ.-мат. наук, проф., вед. науч. сотр., e-mail: andreeva@ipmt-hpm.ac.ru, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН), г. Черноголовка

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА СУБНАНОМЕТРОВОМ МАСШТАБЕ ИОН-ТРАНСПОРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКИРУЮЩИХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРОВОДНИК/ТВЕРДЫЙ ЭЛЕКТРОЛИТ

Поступила в редакцию 14.06.2012

На основе нового структурно-динамико-кинетического подхода наноионики выполнены вычислительные эксперименты, в которых процессы быстрого ионного транспорта (БИТ) в области идеально поляризуемых когерентных гетеропереходов электронный проводник/твердый электролит—передовой суперионный проводник (ПСИП) исследованы с субнанометровым разрешением. Ион-транспортные "скрытые" переменные и наблюдаемые физические величины рассчитаны на временных масштабах 10—10⁻⁷ с. Предложенная компьютерная модель позволяет предсказывать БИТ-характеристики суперконденсаторов на основе ПСИП-приборов, которые необходимы для развития наноэлектроники и микросистемной техники. **Ключевые слова**: наноионика, наноионные приборы, твердые электролиты, передовые суперионные проводники, блокирующие гетеропереходы, быстрый ионный транспорт, компьютерное моделирование, скрытые и наблюдаемые величины, детальное равновесие, кинетическое уравнение

Введение

Когнитивное значение "скрытых" переменных и параметров возрастает с развитием нанотехнологий [1]. Наноионика [2] передовых суперионных проводников (ПСИП) [3] — твердых тел с кристаллической структурой, близкой к оптимальной для быстрого ионного транспорта (БИТ), также должна использовать модели и методы, которые с помощью "скрытых" переменных дают детальное описание процессов и механизмов БИТ в наносистемах. В работе [4] предложен новый структурнодинамико-кинетический подход, позволяющий с субнанометровым разрешением описывать процессы БИТ в области идеально поляризуемых гетеропереходов электронный проводник/твердый электролит (ЭП/ТЭ) — функциональных элементов перспективных приборов наноэлектроники и нано(микро)системной техники. Подход [4] включает:

1) структурно-динамическую модель (С—ДМ), которая с единых позиций рассматривает быстрые и медленные процессы в области ЭП/ТЭ—ПСИП как движение ионов подвижного сорта в потенциальном рельефе, искаженном на гетерогранице;

2) метод "скрытых" переменных, рассматривающий процессы БИТ на субнанометровом масштабе в терминах концентраций ионов подвижного сорта на кристаллографических плоскостях (множество состояний) в области тонкой структуры двойного электрического слоя (ДЭС);

3) физико-математический формализм, оперирующий "скрытыми" переменными, базирующийся на понятии детального баланса и кинетическом уравнении в форме закона сохранения частиц.

С помощью подхода [4] могут быть найдены функции распределения заряда в ДЭС на структурно-упорядоченном (когерентном) гетеропереходе ЭП/ТЭ—ПСИП, где существует дискретная система параллельных кристаллографических плоскостей, заселенность которых ионами подвижного сорта зависит от внешнего воздействия.

В настоящей работе на основе 1)—3) выполнено численное моделирование ион-транспортных процессов в области идеально поляризуемых когерентных гетеропереходов ЭП/ТЭ-ПСИП. Расчеты сделаны для случая малых, вызванных внешним воздействием, неравновесных токов в кристаллической структуре ДЭС. Генератор тока (имитатор внешнего воздействия) задает режим формирования ДЭС (в условиях отсутствия фарадеевских реакций), изменяя концентрацию катионов подвижного сорта на заданных кристаллографических плоскостях в приграничной области ТЭ и электронную плотность на поверхности ЭП. Моделирование по 1)-3) в сочетании с методами кристаллограничного дизайна [5] открывает перспективы проектных исследований по созданию новых приборов с БИТ, в том числе трехэлектродных [6]. Согласно [2], в наноприборах может быть реализована идея контролируемого влияния электрода на особые ион-транспортные свойства области ДЭС.

Расчеты и моделирование процессов в ДЭС на гетеропереходах ЭП/ТЭ—ПСИП выполнены с помощью специально разработанного программного комплекса, который базируется на стандартных командах пакета Wolfram Mathematica.

1. Основы нового подхода для описания процессов БИТ в области идеально поляризуемых когерентных гетеропереходов ЭП/ТЭ—ПСИП

В работе [4] идеально поляризуемый гетеропереход ЭП/ X^i (i = 1, 2, ..., M) рассматривается как когерентный. Кристаллографические плоскости X^i (i = 1, 2, ..., M), где катионы подвижного сорта находятся в минимумах потенциального рельефа "жесткой" анионной подрешетки ТЭ—ПСИП, считаем ориентированными параллельно поверхности ЭП (X^0). Система плоскостей X^i (i = 1, 2, ..., M) расположена в области формирования ДЭС. Концентрацию "неосновных носителей" (дефекты жест=кой подрешетки ТЭ—ПСИП) считаем незначительной. В декартовой системе координат *хуг* решаем одномерную по *х* задачу, в которой состояние катиона $i \in S$ в ТЭ—ПСИП однозначно определяет координат x_i плоскости X^i (S — линейно упорядо-

ченное множество). Химический потенциал катионов не зависит от x_i , поэтому на X^i (i = 1, 2, ..., M) равновесные концентрации катионов равны n_0 . Катионы перемещаются между плоскостями X^i и X^{i+1} через потенциальные барьеры высотой $\eta_{i, i+1}$. В ПСИП—ТЭ α —RbAg₄I₅ расстояние Δ между соседними параллельными плоскостями X^i и X^{i+1} , направление нормали к которым совпадает с направлением каналов БИТ (100), составляет примерно 0,15 нм, в ПСИП α —AgI — примерно 0,12 нм [7, 8]. В области ДЭС высота барьеров $\eta_{i, i+1}$ уменьшается с увеличением индекса *i*, т. е. по мере удаления от ЭП. Представление об изменении потенциального рельефа в области ДЭС на гетеропереходе ЭП/ТЭ—ПСИП дает рис. 1.

"Скрытыми" переменными являются концентрации n_i (заселенности состояний $i \in S$), которые при внешнем воздействии на гетеропереход являются функциями t. Для гетероперехода ЭП/ТЭ—ПСИП принцип детального равновесия и основное кинетическое уравнение можно записать в виде уравнений [9—11]

$$w_{i \to j}/w_{j \to i} = \exp[(E_i - E_j)/k_B T]; \qquad (1)$$

$$dP_i/dt = \Sigma(P_j w_{j \to i} - P_i w_{i \to j}), i \neq j; i, j \in S, \quad (2)$$

где величины w — вероятности переходов катионов между состояниями в тонкой структуре ДЭС, т. е. переходы из одной плоскости в другую $X^i \leftrightarrow X^{i+1}$ через потенциальные барьеры высотой $\eta_{i, i+1}$; P_i — вероятность найти катион в X^i (в состоянии *i*); $(E_i - E_j)$ — разность энергий катионов в состояниях *i* и *j*; k_B — константа Больцмана; T — температура в К.

Принцип детального равновесия выполняется для марковских случайных процессов, у которых статистические свойства в момент времени $t^* + dt$ (dt > 0) зависят только от процессов при t^* . Для



Рис. 1. Одномерная модель потенциального рельефа, в котором находятся катионы подвижного сорта в области ДЭС на когерентном гетеропереходе ЭП/ТЭ—ПСИП. Катионы перескакивают между минимумами рельефа, помечаемыми индексом состояния *i* (кристаллографические плоскости X^i), через потенциальные барьеры с уменьшающейся по мере удаления от ЭП высотой $\eta_{i, i+1}$

марковских процессов, протекающих в наноструктуре X^i (i = 1, 2, ..., M), выполняется $P_i(t) \propto n_i(t)$, поскольку

$$P_i(t) = n_i(t) / \Sigma n_i,$$

где сумма Σn_i задается внешним воздействием. Тогда формула (2) принимает вид закона сохранения числа катионов:

$$dn_i/dt = \sum (n_j w_{j \to i} - n_i w_{i \to j}), \qquad (3)$$

где суммирование проводится по j ($j \neq i$). Величины E_i в формуле (1) определены с точностью до произвольной константы E^* , а формула (3) определяет $\{n_i\}$ с точностью до множителя N^* . Для X^i ($i \neq 1, M$) переходы возможны только в соседние плоскости X^{i+1} и X^{i-1} , поэтому в (3) $j = i \pm 1$. Для блокирующего ЭП переходы между X^0 и X^1 запрещены, а для X^M происходят переходы $M \leftrightarrow M - 1$. В систему уравнений (3) введем для dn_M/dt дополнительный член $\delta I_M(t)$ — плотность тока внешнего воздействия (граничное условие). Множество "скрытых" величин $\{n_i\}$ — переменные состояний, определяемые системой дифференциальных уравнений (3).

Вероятности *w* в формуле (3) зависят от направления вектора напряженности электрического поля. Пусть поле между любыми соседними плоскостями X^i и X^{i+1} является однородным (приближение эффективного поля). Для переходов катионов $i \rightarrow i+1$, которые происходят по направлению поля, дно потенциальной ямы с индексом *i* смещено вверх относительно дна ямы i+1 на величину $(e^2\Delta/\epsilon\epsilon_0)\Sigma(n_j-n_0)$, а высота барьера для переходов $i \rightarrow i+1$ ($i+1 \rightarrow i$) будет меньше (больше), чем $\eta_{i, i+1}$, на величину полевой добавки ($\Omega_{i+1, M}$), зависящей через функции $\{n_i\}$ от *t*:

$$\Omega_{i+1, M}(t) \equiv (e^2 \Delta/2\varepsilon_i \varepsilon_0) \Sigma(n_j - n_0), \qquad (4)$$

где $i + 1 \le j \le M$; e — заряд электрона; ε_i — эффективная относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 — электрическая постоянная. В кристаллах ПСИП равновесные концентрации вакантных позиций $n_{vac} \sim 5n_0$ [7, 8], однако в (3) мы используем приближение $n_{vac} \gg n_0$, которое устраняет возможность блокировки переходов $i \rightarrow j$.

Вероятности $w_{i \to i+1}$ пропорциональны частотам $v_{i \to i+1}$ соответствующих переходов. В свою очередь, $v_{i \to i+1} \propto v_D$ (частота колебаний кристаллической решетки, порядка Дебаевской частоты ~ $10^{12} c^{-1}$ [12]), т. е.

$$w_{i \to i+1}(t) \propto v_{i \to i+1} \approx \\ \approx v_D \exp\left\{-\left[\eta_{i, i+1} - \Omega_{i+1, M}\right]/k_BT\right\};$$
(5)

$$w_{i+1 \to i}(t) \propto v_{i+1 \to i} \approx \\ \approx v_D \exp\left\{-\left[\eta_{i, i+1} + \Omega_{i+1, M}\right]/k_BT\right\}.$$
 (6)

Таким образом, формулы (5) и (6) конкретизируют значения E^* и N^* в (1) и (3), делают отношения $w_{i \to i+1}/w_{i+1 \to i}$ в (1) функциями времени, а также вводят динамику в кинетические уравнения. Замена в (3) величин w на v и умножение правой и левой частей на элементарный заряд e, дают выражение для индуцированных внешним воздействием токов $\delta I_i(t)$, которые протекают в тонкой структуре ДЭС через соответствующие плоскости X^i (минимум потенциального рельефа с координатой x_i):

$$\delta I_i(t) = e \sum (n_j v_j \to i - n_i v_i \to j), \tag{7}$$

где суммирование проводится по j ($j = 1, ..., M, j \neq i$). Для произвольного j (кроме $j \neq 1, M$) переходы катионов возможны только в соседние плоскости X^{j+1} и X^{j-1} , т. е. правая часть (7) содержит четыре компоненты:

$$\delta I_{j}(t) = (\delta I_{j \to j+1} + \delta I_{j \leftarrow j+1}) + (\delta I_{j \to j-1} + \delta I_{j \leftarrow j-1}),$$
(8)

где величина

$$\delta I_{j \to j+1} + \delta I_{j \leftarrow j+1} \equiv \delta I_{j,j+1}(t) \tag{9}$$

определяет результирующую плотность тока через потенциальный барьер, имеющий высоту $\eta_{j, j+1}$, если все величины $\{n_j\}$ равны n_0 . Компонента $\delta I_{j \to j+1}$ ($\delta I_{j \leftarrow j+1}$) представляет ток катионов через барьер $\eta_{j, j+1}$ в положительном (отрицательном) направлении оси *x*. Аналогичный смысл имеют $\delta I_{j \to j-1}$ и $\delta I_{j \leftarrow j-1}$.

Оценка эффективной толщины ДЭС ($L_{эф\phi}$) выполнена в работе [4]. Показано, что у характерной длины L проникновения электрического поля в ПСИП на гетеропереходе ПСИП-ТЭ/ЭП зависимость от n_0 и T такая же, как у длины экранирования заряда Дебая, т. е. для оценок толщины ДЭС можно принять:

$$L_{abb} \approx L \propto (T/n_0)^{0.5}.$$
 (10)

Численное решение системы (3) с учетом формул (4)—(6) дает $L_{9\phi\phi} < 0,1$ нм при $n_0 = 10^{18}$ м⁻² и T = 300 К.

2. Компьютерное моделирование. Пространственно-временные, частотные, концентрационные и температурные зависимости распределения заряда в тонкой структуре ДЭС на гетеропереходах ЭП/ТЭ–ПСИП.

2.1. Устойчивость решения системы дифференциальных уравнений

Численное решение системы (3)-(6) с граничными условиями, задающими внешнее воздействие, дает множество $\{n_i(t)\}$ переменных состояния. Определенным комбинациям $n_i(t)$ соответствуют скрытые физические величины (например, сдвиг фаз между внешним током и потенциалом кристаллографической плоскости) и наблюдаемые величины (например, импеданс Z гетероперехода), которые характеризуют процессы в ДЭС. Внешнее воздействие на $\Theta \Pi / X^i$ (*i* = 1, ..., *M*) создает неравновесное распределение катионов в тонкой структуре ДЭС. После прекращения воздействия это распределение $(n_1, n_2, ..., n_M)$ релаксирует к аттрактору $(n_{1}^{*}, n_{2}^{*}, ..., n_{M}^{*})$, при этом выполняется закон сохранения заряда на гетеропереходе, отключенном от нагрузки:

$$e\sum n_i = e\sum n_i^* = \text{const.}$$
(11)

Решение системы уравнений (3) с учетом (4)— (6) и (11) должно обладать свойством устойчивости, т. е. любые начальные неравновесные распределения катионов $(n_1, n_2, ..., n_M)$, удовлетворяющие условию

(11), должны при $t \to \infty$ переходить в $(n_1^*, n_2^*, ..., n_M^*)$. На рис. 2 показано поведение разности двух решений $y_i(t) - Y_i(t)$, где i = 1...10. Функции $y_i(t)$ и $Y_i(t)$ — относительные изменения заселенности $(n_i - n_0)/n_0$ состояния *i* при разных начальных распределениях катионов в тонкой структуре ДЭС (условие $\Sigma n_i =$



Рис. 2. Временные зависимости $y_i(t) - Y_i(t)$, где функции y_i и Y_i соответствуют разным начальным распределениям катионов в ДЭС на гетеропереходе ЭП/ X^i (i = 1...10), T = 300 К, $n_0 = 10^{18}$ м⁻². Решение $y_i(t)$ отвечает дефициту катионов на плоскости X^2 , в случае $Y_i(t)$ дефицит катионов был на X^{10} ($n_2 = n_{10} < n_0$). Последовательность потенциальных барьеров:

 $\eta_{1, 2} = 0,7$ эВ, $\eta_{2, 3} = 0,65$ эВ, $\eta_{3, 4} = 0,6$ эВ, $\eta_{4, 5} = 0,55$ эВ, $\eta_{5, 6} = 0,5$ эВ, $\eta_{6, 7} = 0,5$ эВ и $\eta_{i, i+1} = 0,3$ эВ (i = 7, 8 и 9). Номера графиков соответствуют индексу *i* кристаллографической плоскости. Для наглядности, величина $y_1(t) - Y_1(t)$ увеличена в 10 раз

= сопят выполняется). Решение $y_i(t)$ соответствует начальному распределению { $n_0(x_1)$, $n_2(x_2)$, $n_0(x_3)$, $n_0(x_4)$, $n_0(x_5)$, $n_0(x_6)$, $n_0(x_7)$, $n_0(x_8)$, $n_0(x_9)$, $n_0(x_{10})$, $t_0 = 0$ } а $Y_i(t)$ — распределению { $n_0(x_1)$, $n_0(x_2)$, $n_0(x_3)$, $n_0(x_4)$, $n_0(x_5)$, $n_0(x_6)$, $n_0(x_7)$, $n_0(x_8)$, $n_0(x_9)$, $n_{10}(x_{10})$, $t_0 = 0$ }, где $n_2(x_2) = n_{10}(x_{10}) < n_0$. Рис. 2 доказывает устойчивость решений системы (3) с учетом (4)—(6), (11) и показывает, что при T = 300 K, $n_0 = 10^{18}$ м⁻² и $\eta_{j, j+1} = 0,7$ эВ в неравновесном ДЭС время релаксации $\tau_r < 1$ с.

2.2. Основной фактор релаксации. Увеличение емкости ДЭС в пределе $t \to \infty$

На рис. 3 приведены результаты расчета системы уравнений (3)—(6) для функций $y_i(t) = (n_i - n_0)/n_0$, соответствующих гетеропереходу $\Im \Pi/X^i$ (i = 1...10), где $\eta_{i, i+1} = 0,7$ $\Im B$ (i = 1...9), $n_0 = 10^{18} \text{ m}^{-2}$, T = 300 K. В момент t = 0 дефицит катионов (5%) был только на X^{10} . Время релаксации гетероперехода $\tau_r < 1$ с. Величины $y_3(t)...y_8(t)$ малы по сравнению с $y_1(t), y_2(t), y_9(t)$ и $y_{10}(t)$. Это доказывает, что дальнодействующее электрическое поле является основным фактором релаксации при малых отклонениях y_i от нулевых равновесных значений.

Напряжение на гетеропереходе ЭП/ X^{i} (i = 1...10) уменьшается при релаксации (выполняется условие $e \sum n_{i} = \text{const}$), поэтому при $t \to \infty$ емкость ДЭС ($C_{ДЭС}$) возрастает. Это соответствует представленным в литературе экспериментальным данным, но противоречит интерпретациям [13, 14], когда на основе модели адсорбционной релаксации ДЭС и концепции неосновных носителей заряда в эквивалентные электрические схемы гетеропереходов ПСИП/ЭП вводят адсорбционную емкость $C_{ad} = \text{const}$ ($C_{ad} \gg C_{ДЭС} = \text{const}$), с помощью которой согласуют расчетные и экспериментальные данные для низкочастотного внешнего воздействия.



Рис. 3. Релаксация заряда в ДЭС на гетеропереходе ЭП/ X^i (i = 1...10), где $\eta_{i,i+1} = 0,7$ эВ, $n_0 = 10^{18} \text{ m}^{-2}$, T = 300 K. Номера графиков 1...10 соответствуют индексу i кристаллографической плоскости. Для наглядности, ряд величин $y_i(t) = (n_i - n_0)/n_0$ по-казан в увеличенном масштабе: $2y_2$, $10y_3$, $50y_4$, $100y_5$, $4000y_6$, $500y_7$, $50y_8$, $2y_9$

2.3. Детальный баланс и принцип минимума энергии

Настоящая работа базируется на понятии детального баланса, сущность и физические основы которого продолжают обсуждать в научной литературе [15]. Вблизи аттрактора $\binom{n}{1}, n_2^*, ..., n_M^*$ обращаются в нуль не только величины $y_i(t) - Y_i(t)$ (см. рис. 2), но и токи $\delta I_{j, j+1}(t)$, протекающие в тонкой структуре ДЭС (рис. 4). При этом (3) принимает вид уравнения детального баланса

$$n_j w_{j \to j+1} = n_{j+1} w_{j+1 \to j}. \tag{12}$$

Величина ($\Xi - \Xi^*$)/ Ξ^* , где Ξ — энергия электростатического поля неравновесного распределения ($n_1, n_2, ..., n_M$), а Ξ^* — энергия поля аттрактора ($n_1^*, n_2^*, ..., n_M^*$), может служить мерой неравновесности распределения заряда в ДЭС (условие $\Sigma n_i =$ сопят выполняется). Рис. 5 соотносит изменение токов $\delta I_{1, 2}, \delta I_{2, 3}$ и $\delta I_{3, 4}$ в ДЭС ($\delta I_{3, 4} \gg \delta I_{j, j+1}(t), j > 3$) с изменением ($\Xi - \Xi^*$)/ Ξ^* .

Из анализа полученных данных можно сделать вывод, что при релаксации ДЭС на гетеропереходе



Рис. 4. Установление детального баланса в ДЭС, обращение в нуль $\delta I_{j,j+1}(t) \equiv \delta I_{j \rightarrow j+1} + \delta I_{j \leftarrow j+1}$ плотностей токов (А · м⁻²) при релаксации неравновесного распределения катионов в ДЭС. Номера графиков *I...7* соответствуют индексу *i* кристаллографической плоскости



Рис. 5. Временные зависимости относительной энергии $(\Xi - \Xi^*)/\Xi^*$ и плотностей тока $\delta I_{1,2}$, $\delta I_{2,3}$, $\delta I_{3,4}$ (произвольный масштаб) в тонкой структуре ДЭС. Номера графиков *1*, *2* и *3* соответствуют индексу *i* кристаллографической плоскости. Номер графика *0* соответствует величине $(\Xi - \Xi^*)/\Xi^*$. Исходное распределение катионов в потенциальном рельефе, как для рис. 2: { $n_0(x_1)$, $n_2(x_2)$, $n_0(x_3)$, $n_0(x_4)$, $n_0(x_5)$, $n_0(x_6)$, $n_0(x_7)$, $n_0(x_8)$, $n_0(x_9)$, $n_0(x_{10})$, $t_0 = 0$ }, где $n_2 < n_0$

ЭП/ X^i (i = 1...M) возникает ряд причинно-следственных связей: произвольное неравновесное распределение заряда \rightarrow отклонение чисел заполнения n_j и вероятностей переходов $w_{j+1 \rightarrow j}$ от значений, задаваемых детальным балансом \rightarrow появление транспортных процессов с суммарными потоками $\delta I_{j, j+1}(t)$, которые стремятся к нулю с уменьшением ($\Xi - \Xi^*$)/ $\Xi^* \rightarrow$ достижение аттрактора с минимумом энергии.

В литературе принцип минимума энергии обычно указывают в качестве фундаментальной основы, управляющей эволюцией неравновесных физико-химических систем. Компьютерный эксперимент показывает: глобальный по отношению к системе частиц принцип наименьшей энергии является следствием согласованных (дальнодействующим кулоновским взаимодействием) переходов отдельных частиц в локальные состояния, имеющие только "в среднем" все меньшую энергию.

2.4. Гармоническое внешнее воздействие на гетеропереход

Результирующий ток (9) равен нулю в состоянии равновесия (в соответствии с принципом детального равновесия $|\delta I_{j \to j+1}| = |\delta I_{j \leftarrow j+1}|$). Модуль $|\delta I_{j \to j+1}|$ можно оценить по формуле [4]:

$$|\delta I_{j \to j+1}| \sim e n_0 v_D \exp(-\eta_{j, j+1}/k_B T).$$
 (13)

Величина $|\delta I_{j \to j+1}|$ — плотность тока обмена на потенциальном барьере $\eta_{j, j+1}$ [4]. При $n_0 = 10^{18} \text{ m}^{-2}$, $T = 300 \text{ K и } v_D = 10^{12} \text{ c}^{-1}$ ток обмена имеет порядок $2,7 \cdot 10^{-1}$, $6,3 \cdot 10^2$ и $1,5 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ для барьеров $\eta_{j, j+1}$ высотой 0,7, 0,5 и 0,3 эВ соответственно. Критерий малости внешнего воздействия по току можно записать в виде [4]:

$$|\delta I_{j,j+1}| / |\delta I_{j \to j+1}| \ll 1.$$
(14)

На рис. 6 и 7 показаны переменные токи $\delta I_{j,j+1}(t)$, протекающие через потенциальные барьеры $\eta_{j,j+1}$



туре ДЭС на модельном гетеропереходе $\Im D/X^i$ (i = 1...10). Номера графиков *I...9* соответствуют индексу *i* кристаллографической плоскости, номер *10* — ток, который генератор тока задает на плоскости с индексом *i* = 10. Линейная частота $\omega/2\pi = 900$ Гц, T = 380 K, $n_0 = 10^{17}$ м⁻²



Рис. 7. Ток внешнего воздействия $\delta I_{10}(t) = \delta I \sin(\omega t)$ и переменные токи ионной проводимости $\delta I_{j, j+1}(t)$ в тонкой структуре ДЭС на модельном гетеропереходе ЭП/ X^i (i = 1...10). Номера графиков 7, 8 и 9 соответствуют индексу *i* кристаллографической плоскости, номер I0 — ток, который генератор тока задает на плоскости с индексом i = 10. Линейная частота $\omega/2\pi = 10^6$ Гп, T = 300 К, $n_0 = 10^{18}$ м⁻². Для наглядности, амплитуды $\delta I_{1,2}$ и $\delta I_{2,3}$ увеличены на графиках в 50 000 раз, $\delta I_{3,4}$ — в 5000 раз, $\delta I_{4,5}$ — в 500 раз, $\delta I_{5,6}$ и $\delta I_{6,7}$ — в 50 раз, δI_{10} увеличен на 30 %

в области ДЭС гетероперехода ЭП/ X^i (i = 1, 2, ..., M), где $\eta_{1, 2} = 0,7$ эВ, $\eta_{2, 3} = 0,65$ эВ, $\eta_{3, 4} = 0,6$ эВ, $\eta_{4, 5} = 0,55$ эВ, $\eta_{5, 6} = 0,5$ эВ, $\eta_{6, 7} = 0,5$ эВ и $\eta_{i, i + 1} = 0,3$ эВ (i = 7, 8 и 9), T = 300 К и 380 К и $n_0 = 10^{18}$ м⁻² и 10^{17} м⁻². Внешнее воздействие генератор тока задает на X^{10} , плотность тока $\delta I_{10}(t) = \delta I \sin(\omega t)$, амплитуда которого удовлетворяет критерию малости (14): $\delta I << \max |\delta I_{j \to j + 1}|$ для всех $\eta_{i, i + 1}$.

Из результатов расчетов следует (рис. 6 и 7), что с увеличением частоты $\omega/2\pi$ внешнего воздействия уменьшаются плотности токов $\delta I_{j, j+1}(t)$ через барьеры высотой 0,7, 0,5, 0,6, 0,55, 0,5, 0,5 эВ, а сдвиги фаз между $\delta I_{10}(t)$ и $\delta I_{j, j+1}(t)$ возрастают. При $\omega/2\pi = 10^6$ Гц вещество в области между плоскостями $X^0 - X^7$ проявляет диэлектрические свойства (токи $\delta I_{1,2}$, $\delta I_{2,3}$, $\delta I_{3,4}$, $\delta I_{4,5}$, $\delta I_{5,6}$ и $\delta I_{6,7}$ малы).

2.5. Гармоническое внешнее воздействие: импеданс гетероперехода $\Im \Pi/X^i$ (i = 1...10)

Разность потенциалов между кристаллографической плоскостью *X*¹⁰ (граница гетероперехода со стороны ТЭ—ПСИП) и ЭП определим как

$$U_{10,0}(t) = \sum U_{i+1,i}(t), \ 0 \le i \le 10,$$
(15)

где $U_{i+1,i}(t)$ — разность потенциалов между X^{i+1} и X^{i} . Например,

$$U_{6,5}(t) = (e\Delta/\epsilon_0 \epsilon_5) \Sigma(n_i - n_0), \ 6 \le i \le 10,$$
 (16)

где ε_5 — эффективная относительная диэлектрическая проницаемость слоя между плоскостями X^5 и X^6 , ε_0 — электрическая постоянная. Условие отсутствия электрохимической реакции на ЭП можно записать для ПСИП с катионной проводимостью в виде: $U_{10,0}(t) \leq 0$. Напряжение на гетеропереходе определим как $V_{10,0}(t) \equiv -U_{10,0}(t)$. В общей теории линейных систем термин "импеданс" вводят через обобщенный закон Ома, т. е. через отношение сопряженных переменных ("возмущение" и "отклик") [16]. В области линейного приближения обычно используют метод комплексных амплитуд, т. е. осуществляют замену переменных

"возмущение"
$$\delta I_{10}(t) \rightarrow \delta I \exp(i\omega t),$$
 (17)

"отклик"
$$V_{10,0}(t) \rightarrow V_{10,0} \exp(i\omega t + i\varphi).$$
 (18)

Это позволяет определить импеданс гетероперехода Z, как $V_{10,0} \exp(i\omega t + i\varphi)/\delta I \exp(i\omega t) = Z$, где $V_{10,0}$ и δI — действительные числа, амплитуды напряжения на гетеропереходе и задаваемой генератором тока плотности тока через плоскость X^{10} , *i* — мнимая единица, $\varphi < 0$ при емкостном характере Z. Расчет по (3)—(6) при значениях $n_0 = 10^{17}$ м⁻², T = 380 K, $\eta_{i, i+1} = 0,7$ эВ (*i* = 1, 2 и 3), $\eta_{i, i+1} = 0,5$ эВ (*i* = 4,5 и 6), $\eta_{i, i+1} = 0,3$ эВ (*i* = 7, 8 и 9) эВ дает решения (см. таблицу), которые с высокой точностью удовлетворяют условиям линейности при изменении δI в 100 раз.

Данные расчетов по частотному поведению Z могут быть непосредственно сопоставлены с экспериментальными данными импедансной спектроскопии реальных гетеропереходов. Сравним информацию, полученную из расчетов частотного поведения Z (рис. 8), с информацией, которую несут такие комбинации скрытых переменных, как интегралы по времени от $\delta I_{j, j+1} U_{j+1, j}$ (рис. 9) за период внешнего гармонического воздействия (энергия, рассеиваемая на потенциальных барьерах $\eta_{i, i+1}$). Рис. 8 и 9 показывают, что данные вычислительного эксперимента дают для Re Z и Im Z значительно более скудную информацию по сравнению с той, что содержат комбинации скрытых переменных, определяющих рассеяние энергии на отдельных потенциальных барьерах в ДЭС (рис. 9).

Расчет компонент вектора импеланса 7 и емкости
$V_{\rm rescaled} = 10^{-2} T - 200 V$
$n_0 = 10 \text{ M}, 1 = 380 \text{ K},$
η_{i} $_{i+1} = 0,7$ $_{3}B$ ($i = 1, 2 \times 3$), η_{i} $_{i+1} = 0,5$ $_{3}B$ ($i = 4, 5 \times 6$),
$n_{1} = 0.3$ $B (i = 7, 8 \times 9)$ $B n_{2}$ и разных значениях
(1, 1+1)
амплитуды плотности тока внешнего воздеиствия
$\delta I (\omega/2\pi = 90 $ Γμ)

Амплитуда плотности тока δI , $A \cdot m^{-2}$	Re Z, $OM \cdot M^2$	Im Z, $OM \cdot M^2$	Плотность емкости, $\Phi \cdot M^{-2}$
$1,6 \cdot 10^{-3} \\ 1,6 \cdot 10^{-2} \\ 1,6 \cdot 10^{-1}$	0,00182936 0,00182775 0,00182697	0,00559489 0,00559433 0,00559479	0,316072 0,316104 0,316077



Рис. 8. Поведение Re Z и Im Z гетероперехода $\Im \Pi/X^i$ в частотном диапазоне 1 Гц...1 МГц (данные вычислительных экспериментов). Последовательность потенциальных барьеров $\eta_{i, i+1}$: 0,7, 0,65, 0,6, 0,55, 0,5, 0,5, 0,3, 0,3, 0,3 эВ:

 $1 - n_0 = 10^{18} \text{ m}^{-2}$, T = 380 K; $2 - n_0 = 10^{18} \text{ m}^{-2}$, T = 300 K; $3 - n_0 = 10^{17} \text{ m}^{-2}$, T = 300 K



Рис. 9. Энергия, которая выделяется между плоскостями X^i и X^{i+1} за период гармонического внешнего воздействия (данные вычислительных экспериментов). Последовательность потенциальных барьеров на гетеропереходе ЭП/ X^i имеет вид: 0,7, 0,65, 0,6, 0,55, 0,5, 0,5, 0,3, 0,3, 0,3 эВ. Номера графиков 1...9 соответствуют индексу *i* кристаллографической плоскости, $n_0 = 10^{18}$ м⁻², T = 300 K (см. рис. 8, график 2)

2.6. Импульсное внешнее воздействие: емкость гетероперехода $\Im \Pi/X^i$ (i = 1...10)

В гальваностатическом режиме ($\delta I_{10}(t) = \text{const}$ при $t \ge 0$), т. е. при подаче на гетеропереход "ступеньки" тока, отношение заряда Q(t), накопленного на $\Im \Pi/X^i$ (i = 1...10), к напряжению $V_{10,0}(t)$ можно рассматривать как емкость гетероперехода. Расчеты показывают (рис. 10, 11), что для гетероперехода с последовательностью потенциальных барьеров 0,7, 0,65, 0,6, 0,55, 0,5, 0,5, 0,3, 0,3, 0,3 эВ величина $Q(t)/V_{10,0}(t)$ увеличивается с возрастанием t, т. е. гетеропереход ведет себя как большая (малая) емкость в пределе $t \to \infty$ ($t \to 0$).

Рисунки 12—14 раскрывают процессы, определяющие изменение $Q(t)/V_{10,0}(t)$ на рис. 10 и 11, и показывают изменение $V_{10,0}(t)$ и заселенностей $|y_i(t)| = |(n_i - n_0)/n_0|$ кристаллографических позиций

 X^i в ДЭС (гетеропереход с последовательностью потенциальных барьеров 07, 065, 06, 055, 05, 05, 03, 03, 03 эВ) в гальваностатическом режиме. В области малых *t* заряд, накапливается в основном на кристаллографической плоскости X^7 , которая отделена от плоскости X^6 потенциальным барьером высотой 0,5 эВ. При увеличении *t* становится значи-



Рис. 10. Изменение плотности емкости ($Q/V_{10,0}$) гетероперехода $\Im \Pi/X^i$ (i = 1...10) при гальваностатическом включении ($t \to 0$)



Рис. 11. Изменение плотности емкости ($Q/V_{10,0}$) гетероперехода $\Im \Pi/X^i$ (i = 1...10) при гальваностатическом включении ($t \to \infty$)



Рис. 12. Временные зависимости $V_{10,0}(t)$ и $|y_i(t)|$ для гетероперехода ЭП/ X^i (i = 1...10):

I — напряжение $V_{10,0}(t)$; *2* — заселенность $|y_7(t)|$ кристаллографической плоскости X^7 , которая отделена от плоскости X^6 потенциальным барьером высотой 0,5 эВ. У других величин $|y_i(t)|$, где (i < 7), скорости изменения значительно меньше, чем у $|y_7(t)|$





1 — напряжение $V_{10,0}(t)$ на гетеропереходе; 2 — заселенность $|y_7(t)|$; 3 — заселенность $|y_3(t)|$; 4 — заселенность $|y_4(t)|$; 5 — заселенность $|y_5(t)|$. По сравнению с рис. 12 временной интервал увеличен в 10 раз



Рис. 14. Временные зависимости $V_{10,0}(t)$ и $|y_i(t)|$:

1 — напряжение $V_{10,0}(t)$ на гетеропереходе; 2 — заселенность $|y_2(t)|$; 3 — заселенность $|y_3(t)|$; 4 — заселенность $|y_4(t)|$; 5 — заселенность $|y_5(t)|$; 6 — заселенность $|y_1(t)|$. По сравнению с рис. 13 временной интервал увеличен в 10 раз

тельным перенос заряда с плоскости X^7 на плоскости X^i (i < 7), вклад которых в общий заряд гетероперехода постепенно становится доминирующим.

Данные разделов 2.4, 2.5 и 2.6 на разных примерах демонстрируют явление перераспределения неравновесного заряда между кристаллографическими плоскостями в ДЭС: при релаксации роль плоскостей X^i с малыми индексами *i* (большие значения $\eta_{i, i+1}$) увеличивается при $t \to \infty$.

Выводы

На основе нового структурно-динамико-кинетического подхода наноионики выполнены вычислительные эксперименты, в которых с субнанометровым разрешением и при частотах внешнего воздействия 0,1...10⁶ Гц исследованы процессы быстрого ионного транспорта (БИТ) в области идеально поляризуемых гетеропереходов электронный проводник (ЭП)/твердый электролит (ТЭ) — передовой суперионный проводник (ПСИП).

На основании результатов расчетов показано, что дальнодействующее электрическое поле является основным фактором релаксации неравновес-

ного распределения заряда в тонкой структуре двойного электрического слоя (ДЭС) на гетеропереходах ЭП/ТЭ—ПСИП (малые отклонения концентраций ионов от равновесия).

В приближении малости внешнего воздействия (плотности тока) определены соотношения токов и энергия, рассеиваемая в процессе релаксации на отдельных потенциальных барьерах в тонкой структуре ДЭС.

Вычислены зависимости Re- и Im-компонент импеданса Z для модельных гетеропереходов ЭП/ТЭ— ПСИП в частотном диапазоне 0,1 Гц...1 МГц при разных температурах и равновесных концентрациях подвижных ионов.

Показано, что экспериментальные данные, которым соответствуют данные вычислительного эксперимента по частотному поведению импеданса *Z*, дают значительно более скудную информацию по сравнению с той, что содержат комбинации скрытых переменных, определяющих рассеяние энергии на отдельных потенциальных барьерах в ДЭС.

Выполнены оценки зависимости емкости гетероперехода от длительности импульса внешнего воздействия. Показано, что при увеличении длительности внешнего воздействия основной вклад в накопление заряда в ДЭС на гетеропереходе вносят кристаллографические плоскости, которые расположены наиболее близко к блокирующему электроду.

Результаты компьютерных экспериментов дают основу более глубокого понимания процессов в ДЭС и позволяют по-новому интерпретировать экспериментальные данные в терминах "скрытых" переменных.

Предложенный метод компьютерного моделирования может быть развернут в подход, т.е. в совокупность имеющих общие основы методов, различающиеся, например, специфическими граничными условиями в дифференциальных уравнениях. Это позволит согласованно описывать одновременно протекающие емкостные и фарадеевские процессы, что необходимо при расчете ион-транспортных характеристик реальных гетеропереходов и приборов, в том числе суперконденсаторов микрометровых размеров.

Развиваемый структурно-динамико-кинетический подход в наноионике открывает перспективы проектных исследований по созданию новых приборов с БИТ, в том числе трехэлектродных (согласно [2], в наноприборах может быть реализована идея контролируемого влияния электрода на особые ион-транспортные свойства области ДЭС).

Список литературы

1. **Sekimoto K.** Stochastic energetics. Lecture Notes in Physics 799. 2010. Berlin: Springer, Heidelberg. P. 322.

2. Despotuli A. L., Nikolaichik V. I. A step towards nanoionics // Solid State Ionics. 1993. V. 60. P. 275–278.

3. Despotuli A. L., Andreeva A. V., Rambabu B. Nanoionics of advanced superionic conductors // Ionics. 2005. V. 11. P. 306-314.

4. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Модель, метод и формализм нового подхода к описанию процессов ионного транспорта на блокирующих гетеропереходах твердый электролит/электронный проводник // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 9. С. 16—21.

5. Andreeva A. V., Despotuli A. L. Interface design in nanosystems of advanced superionic conductors // Ionics. 2005. V. 11. P. 152–160.

6. Hino T., Hasegawa T., Terabe K., Tsuruoka T., Nayak A., Ohno T., Aono M. Atomic switches: atomic-movement-controlled nanodevices for new types of computing // Sc. Technol. Adv. Mater. 2011. V. 12. P. 013003.

7. Hull S. Superionics: crystal structures and conduction process. Rep. Prog. Phys. 2004. V. 67. P. 1233–1314.

8. Flygare W. H., Huggins R. A. Theory of ionic transport in crystallographic tunnels // J. Phys. Chem. Solids. 1973. V. 34. P. 1199–1204.

9. Gorban A. N., Yablonsky G. S. Extended detailed balance for systems with irreversible reactions // Chemical Engineering Science. 2011. V. 66, N 21. P. 5388–5399.

10. Schnakenbeg J. Network theory of microscopic and macroscopic behavior of master equation systems // Rev. Mod. Phys. 1976. V. 48. P. 571–585.

11. **Platini T.** Measure of the violation of the detailed balance criterion: A possible definition of a "distance" from equilibrium // Phys. Rev. E. 2011. V. 83. P. 011119.

12. **Мерер Х.** Диффузия в твердых телах. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 536 с.

13. Укше Е. А., Букун Н. Г. Развитие модели адсорбционной релаксации двойного слоя в суперионных проводниках // Электрохимия. 1990. Т. 26. В. 11. С. 1373—1381.

14. **Bukun N. G., Ukshe A. E.** Impedance of solid electrolyte systems // Russian Journal of Electrochemistry. 2009. V. 45. N 1. P. 11–24.

15. Gustafson K. Detailed balance // AIP Conf. Proc. 2012. V. 1424. P. 121–132.

16. **Macdonald D. D.** Reflection on the history of electrochemical impedance spectroscopy // Electrochimica Acta. 2006. V. 51. P. 1376–1388.

УДК 512.9

Б. А. Голоденко, д-р техн. наук, проф., Воронежский государственный университет инженерных технологий,

А. Б. Голоденко, канд. физ.-мат. наук, нач. сектора ОАО "Концерн "СОЗВЕЗДИЕ", г. Воронеж, e-mail: post-stamp-bag@yandex.ru

ФРАКТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПОРОЖДЕНИЯ АМОРФНОСТИ ТЕТРАЭДРИЧЕСКОЙ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ

Поступила в редакцию 06.06.2012

На примере кремния изложен способ моделирования механизма порождения аморфности для тетраэдрической атомной структуры. Показано, что порождение аморфности удачно имитируют системы периодических итерированных функций, аргументы которых имеют смысл отклонений диэдрических и валентных углов атомной ячейки воспроизводимой аморфной структуры.

Ключевые слова: аморфная атомная структура, системы итерированных функций, радиальная функция распределения

Введение

Специалистам электронной техники хорошо известны перспективные свойства аморфных полупроводников, в том числе с тетраэдрической атомной структурой и, в первую очередь, аморфного кремния *a*-Si. В частности, высокие фотопроводимость и коэффициент поглощения видимого света таких полупроводников удачно дополняются возможностью их массового производства в виде тонких пленок на недорогих гибких подложках. Подобное сочетание качеств дает реальные возможности создания разнообразных тонкопленочных электронных приборов и, что особенно ценно, эффективных, экономически выгодных фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии на основе аморфного кремния.

Однако отсутствие реально работающих методик расчета электронных процессов, протекающих в структуре подобных материалов, существенно сдерживает их промышленное освоение. Такая ситуация обусловлена господствующим мнением о хаотичности атомной структуры аморфного вещества, что исключает применение к ее описанию зонной теории твердого тела, основанной на понятии периода кристаллической решетки. Отсюда многочисленные попытки моделирования аморфных структур вероятностными методами [1—3], результаты которых, однако, не подтверждаются натурными экспериментами [4, 5] и потому непригодны для практики.

Постановка проблемы

Отсутствие эффективных методов теоретического моделирования и предсказания свойств аморфного вещества современная физика твердого тела справедливо связывает с недостаточным пониманием механизмов порождения аморфности [3]. В отличие от кристаллов аморфные атомные структуры не имеют очевидного, явно выраженного дальнего порядка. Однако всякая аморфная структура в пределах до двух межатомных расстояний обладает отчетливым ближним порядком с единым расположением атомов в типовых пространственных микроструктурах. В частности, каждый атом аморфно-

го кремния, как и кристаллического, находится в центре тетраэдра, в вершинах которого расположены четыре других ближайших к нему атома. При этом отклонения длин межатомных связей аморфного кремния от их значений в кристаллах составляют не более 0,06 Å [6]. Считается, что полное разрушение дальнего порядка тетраэдрической структуры происходит вследствие хаотической вариации отклонений диэдрических углов ее элементарной ячейки и непредсказуемого изменения значений валентных углов той же ячейки в пределах от 98 до 120° [1, 6]. Такое понимание порождения аморфности тетраэдрической атомной структуры неизбежно приводит к вероятностному моделированию, которое не дает ожидаемых результатов, не показывает, каким образом области ближнего порядка соединены друг с другом и не объясняет протяженности упорядоченных областей в некристаллических материалах. Поэтому есть мнение [1, 2], что для математического описания атомной структуры и физических свойств аморфного вещества необходимо понять механизм образования его ближнего порядка и указать топологические правила, которыми этот порядок определяется. Следует полагать, что проблема теоретического моделирования порождения аморфности обусловлена и поддерживается догматическим отрицанием дальнего порядка в структуре аморфного вещества и, вследствие этого, применением неадекватного математического аппарата, ориентированного на воспроизведение структур, беспорядочных и случайных по определению. Поэтому для решения поставленной проблемы необходимо отказаться от интерпретации аморфных структур как хаотичных и беспорядочных, напротив, считая, что аморфная структура исключает случайность, не хаотична и существует неочевидная, однако реальная, строгая закономерность строения ее структуры. Полагая, что аморфность тетраэдрических атомных структур порождается вполне закономерными, согласованными отклонениями диэдрических структур и значений валентных углов, скоординированными с отклонениями длин межатомных связей от их значений в кристаллах [7], следует найти математический аппарат, способный порождать псевдослучайные, внешне хаотические, однако взаимообусловленные и взаимосвязанные значения этих отклонений.

Фрактальные признаки аморфной структуры

Поиск адекватного математического аппарата для моделирования закономерного порождения аморфности тетраэдрической атомной структуры заставляет с новой точки зрения оценить наличие в ней ближнего порядка, который позволяет в любой области такой структуры выделить типовой *фрагмент* — элементарную атомную ячейку, топологически подобную всем остальным ячейкам той же структуры. Тогда фрагментированность и определенное топологическое самоподобие аморфной тетраэдрической атомной структуры дают основание отнести ее к фрактальным объектам и применить к ней математический аппарат современной теории фракталов.

Системы итерированных функций

Полезно напомнить, что с позиций математического описания современная теория фракталов [8] различает геометрические, стохастические и алгебраические фрактальные объекты или просто фракталы. Геометрические фракталы типа ковра Серпинского или снежинки Коха строго регулярны, поэтому математический аппарат их описания и построения принципиально неприменим к моделированию аморфных структур ввиду их внешнего беспорядка. Математический аппарат моделирования стохастических фракталов по определению противоречит принятой гипотезе о строгой упорядоченности аморфной структуры. Остаются алгебраические фракталы, среди математического аппарата которых обращают на себя внимание так называемые системы итерированных функций (СИФ), в частности простейшего вида:

$$x_{i+1} = ax_i + by_i + c;y_{i+1} = dx_i + ey_i + f,$$
(1)

где *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* — вещественные коэффициенты, а переменные x_i и y_i служат аргументами СИФ на каждом очередном шаге вычислений (итераций).

В результате ряда итераций, например от i = 0 до k, такая СИФ порождает упорядоченное множество $\{(x_0, y_0), (x_1, y_1), ..., (x_{k+1}, y_{k+1})\}$ пар чисел, строго выведенных от неких начальных значений ее аргументов (x_0, y_0) до конечной пары чисел (x_{k+1}, y_{k+1}) . При этом уход значений переменных x_i и y_i на бесконечность при $i \rightarrow k$ предотвращается введением некого периода преобразований T такого, что:

$$x'_{0} = \begin{cases} x_{0} + pT, \ p = 1, 2, ..., \infty, \text{ если } x_{0} < -T/2 \\ x_{0}, \text{ если } -T/2 \leqslant x_{0} \leqslant T/2 ; \\ x_{0} - pT, \ p = 1, 2, ..., \infty, \text{ если } x_{0} > -T/2 \end{cases}$$

$$y'_{0} = \begin{cases} y_{0} + qT, q = 1, 2, ..., \infty, \text{если } y_{0} < -T/2 \\ y_{0}, \text{если } -T/2 < x_{0} < T/2 \\ y_{0} - qT, q = 1, 2, ..., \infty, \text{если } y_{0} > -T/2 \end{cases}$$

где x_0 , y_0 и x'_0 , y'_0 — координаты начальных точек соответственно предыдущего и очередного цикла преобразований, результаты которых не выходят за пределы отрезка [-T/2, T/2].

ſ

Дополнение уравнений (1) подобными ограничениями определяет *периодическую* СИФ. Значения величин x_{i+1} и y_{i+1} такой периодической СИФ строго взаимосвязаны и на следующем шаге итераций служат ее аргументами, а период преобразований T обеспечивает им псевдослучайные значения и предотвращает уход на бесконечность. Результатом такого периодического процесса итераций служит регулярное множество внешне вполне беспорядочных пар чисел { (x_i, y_i) }, которое по определению [8] есть не что иное, как алгебраический фрактал. Остается приспособить полученное множество к описанию тетраэдрической аморфной структуры как фрактального объекта.

Физическая интерпретация переменных величин СИФ

Продолжая полагать, что аморфность тетраэдрических атомных структур порождается согласованными отклонениями значений валентных и диэдрических углов от их значений в кристаллах, переменным периодической СИФ как раз и следует придать смысл этих отклонений. Тогда допустимое отклонение длин межатомных связей в ту или иную сторону ограничивает пределы таких отклонений и служит замыкающим звеном воспроизводимой топологии очередной элементарной атомной ячейки аморфной структуры.

Вычисление углов элементарной ячейки аморфной тетраэдрической структуры

Придание переменным СИФ смысла отклонений диэдрических и значений валентных углов от их значений в кристаллах не позволяет, однако, использовать значения этих переменных непосредственно в качестве значений валентных и диэдрических углов аморфной структуры. Формально смысл отклонений валентного угла $\Delta \alpha$ и значения диэдрического угла φ элементам фрактального множества { (x_{i+1}, y_{i+1}) } придан через нормировочные коэффициенты n_{α} и n_{φ} , определяемые из соотношений

$$n_{\alpha} = \frac{\left(x_{i+1}\right)_{\max}}{\Delta \alpha_{\max}} = \frac{T/2}{10\frac{2\pi}{360}};$$
$$n_{\varphi} = \frac{\left(x_{i+1}\right)_{\max}}{\varphi_{\max}} = \frac{T/2}{180\frac{2\pi}{360}}.$$

Тогда значения валентных α и диэдрических углов φ элементарной ячейки аморфной тетраэдрической структуры определяются по формулам

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_k + x_{i+1} n_{\alpha}; \\ \varphi &= y_{i+1} n_{\varphi}, \end{aligned}$$
 (2)

где α_k — значение валентного угла в кристалле.

Поскольку в выражении (2) α_k , n_α и n_φ — константы, а переменные x_{i+1} и y_{i+1} принадлежат фрактальному множеству { (x_{i+1}, y_{i+1}) }, то свойства этих переменных переносятся на значения углов α и φ элементарной ячейки аморфной структуры, которые поэтому оказываются строго взаимообусловленными, но внешне выглядят хаотически. Что и требовалось получить.

Экспериментальная часть и результаты

Изложенный подход позволил воспроизвести в вычислительном эксперименте механизм порождения аморфности тетраэдрической структуры кремния и за приемлемое время построить аморфную структуру из 50 000 атомов с расчетом трехмерных координат каждого из них. Такая структура способна воспроизводить физические свойства реального вещества. Совмещение теоретической радиальной функции распределения (РФР) построенной модели и экспериментальной РФР реального образца аморфного кремния (рис. 1) вполне удовлетворительно и подтверждается численной оценкой совпадения модельной и экспериментальной РФР, которая в среднем составила 95 %.

Гистограмма распределения диэдрических углов построенной модели (рис. 2) повторяет тенденцию распределения диэдрических углов, характерную для моделей Полка—Будро, Коннела—Темкина и Стейнхардта, — возрастание в интервале от 0 до 180° [5].

Сравнение распределений валентных углов построенной модели аморфного кремния (рис. 3) с аналогичным распределением модели Полка [9] показывает их существенное сходство, в том числе



Рис. 1. Результаты совмещения радиальных функций распределения построенной модели и реального образца аморфного кремния

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 11, 2012 –



Рис. 3. Распределение валентных углов модели

наличие единственного максимума на участке от 99 до 119°.

Плотность атомов построенной модели составила $\approx 1,99 \text{ кг/дм}^3$ при справочном значении плотности аморфного кремния 2 кг/дм³.

Предложенная методика успешно использована для практического вычисления потенциальной энергии попарного взаимодействия атомных остовов аморфного и кристаллического кремния, которая в уравнении Шрёдингера выражается оператором [7]

$$\frac{1}{2} \sum_{k} \sum_{l \neq k} \frac{Z_k Z_l e^2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 |\mathbf{R}_k - \mathbf{R}_l|}$$

где e — заряд электрона; $Z_k e$ — заряд k-го ядра; $Z_l e$ — заряд l-го ядра; \mathbf{R}_k — радиус-вектор k-го ядра; \mathbf{R}_l — радиус-вектор l-го ядра; ε — относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 — электрическая постоянная.



Рис. 4. Зависимость потенциальной энергии попарного взаимодействия атомных остовов аморфного и кристаллического кремния от объема модели

Остается только располагать пространственными координатами х, у, z каждого остова, чтобы из соотношения $\mathbf{R}_{k,l}^2 = x_{k,l}^2 + y_{k,l}^2 + z_{k,l}^2$ определить его радиус-вектор. Для атомной структуры аморфного кремния такую возможность предоставляет ее фрактальная модель, построенная на основе систем итерированных функций. Авторская методика и разработанный комплекс программ позволяет строить модели атомной структуры аморфного кремния с любым числом атомов, для каждого из которых вычисляются пространственные координаты x, y, z. Зная совокупность координат атомов модели, в условиях адиабатического приближения и валентной аппроксимации несложно подсчитать потенциальную энергию попарного взаимодействия атомных остовов модели. Результаты такого расчета для моделей аморфного a-Si и кристаллического k-Si кремния с числом атомов от 10 до 1200 даны в таблице. В частности, искомая потенциальная энергия для модели аморфного кремния в 1200 атомов составила 8,73 · 10⁻¹³ Дж. Для сравнения, потенциальная энергия попарного взаимодействия 1200 атомных остовов модели кристаллического кремния составляет 8,13 · 10⁻¹³ Дж. Такая разница в значениях энергии несложно объясняется тем, что аморфная структура в сравнении с кристаллом имеет большее число оборванных межатомных связей и поэтому обладает большей потенциальной энергией.

По данным вычислительного эксперимента (таблица) установлен вид эмпирической зависи-

Число	Потенциальная э взаимодействия ат	нергия попарного омных остовов, Дж	Число	Потенциальная энергия попарного взаимодействия атомных остовов, Дж	
атомов модели	a-Si	<i>k-</i> Si	атомов модели	<i>a</i> -Si	<i>k</i> -Si
10 50 100 200 300 400 500	2,23E-16 3,94E-15 1,29E-14 4,20E-14 8,32E-14 1,37E-13	2,23E-16 3,80E-15 1,24E-14 3,95E-14 7,87E-14 1,28E-13	600 700 800 900 1000 1100	2,71E-13 3,52E-13 4,40E-13 5,37E-13 6,41E-13 7,55E-13 8,75E-13	2,54E-13 3,28E-13 4,11E-13 5,00E-13 5,97E-13 7,02E-13

мости потенциальной энергии попарного взаимодействия атомных остовов как аморфного, так и кристаллического кремния (рис. 4) от числа атомов модели, которая достаточно точно воспроизводится полиномом 4-й степени.

Заключение

Предложенная методика впервые позволила получить модель атомной структуры аморфного кремния объемом в 50 000 атомов и подтвердить ее адекватность совпадением модельной РФР, атомной плотности, распределения диэдрических и валентных углов с аналогичными показателями реальных образцов и наиболее известных моделей атомных структур аморфного кремния. Адекватность построенной модели подтверждает гипотезу о закономерности атомного строения аморфного вещества, а аппарат СИФ позволяет описать тетраэдрическую аморфную структуру всего шестью вещественными коэффициентами. Рассмотренная методика создает реальную возможность аналитически вычислить плотность электронных состояний аморфного кремния и, как следствие,

дать теоретическое обоснование и практическую методику целенаправленного управления типом и концентрацией носителей заряда.

Список литературы

1. Айвазов А. А., Будагян Б. Г., Вихров С. П., Попов А. И. Неупорядоченные полупроводники. М.: Высш. шк., МЭИ. 1995. 351 с.

2. Vink R. L. C. Computer simulations of amorphous semiconductors. Universal Press — Science Publishers, Veenendaal, 2002.

3. Аморфный кремний и родственные материалы / Под ред. Х. Фрицше: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 542 с.

4. Аморфные полупроводники / Под ред. М. Бродски:
Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 419 с.
5. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристал-

5. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. Т. 2. 658 с.

6. **Фельц А.** Аморфные и стеклообразные неорганические твердые тела: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 556 с.

7. **Павлов П. В., Хохлов А. Ф.** Физика твердого тела. М.: Высш. шк., 2000. 494 с.

8. **Кроновер Р. М.** Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории: Пер. с англ. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.

9. Mousseau N., Lewis L. J. Structure of amorphous semiconductors on intermediate length scales // Physical Review Letter. 1997. V. 78. P. 1484.

УДК 681.586

В. В. Амеличев¹, канд. техн. наук, нач. отд.,
В. М. Буданов², канд. физ.-мат. наук, доц.,
Д. В. Гусев¹, ст. науч. сотр.,
Ю. А. Михайлов¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
М. Э. Соколов², д-р мед. наук, проф.,
В. С. Суханов¹, нач. лаб.,
Р. Д. Тихонов³, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
е-mail: r.tikhonov@tcen.ru,
¹НПК "Технологический центр",
²МГУ им. М. В. Ломоносова,
³ООО "НПП "Технология"

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ МАТРИЦ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЭНДОСКОПИЧЕСКИХ ТАКТИЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Поступила в редакцию 11.07.2012

Разработана и исследована новая конструкция кристаллов матриц интегральных преобразователей давления МИПД-7 для тактильных датчиков на основе плоских кремниевых мембран с тензорезистивными преобразователями. Тактильные датчики на основе МИПД-7 прошли полный цикл клинических испытаний в составе эндохирургической аппаратуры.

Ключевые слова: тензорезистивный преобразователь, интегральный тактильный датчик

Появление тактильных датчиков, предназначенных для геометрического распознавания предметов окружающего пространства, обусловлено развитием робототехники. Основной тенденцией в области создания тактильных датчиков является воспроизведение осязательных свойств человеческой кожи. Наиболее предпочтительными являются устройства матричного типа, представляющие собой микроэлектронные датчики силы или давления, позволяющие все вместе сформировать целостное пространственное представление о форме и твердости предмета. Одним из наиболее удобных материалов для создания матриц чувствительных элементов (ЧЭ) является кремний, позволяющий создать на одном кристалле как ЧЭ, так и схемы по обработке информации с ЧЭ. Плотность и число каналов измерения определяются конструкцией и фотолитографическими размерами.

Ранее были описаны [1] разработка и создание опытных образцов искусственных тактильных механорецепторов для эндоскопии. Конструктивнотехнологический базис изготовления матрицы интегральных тензорезистивных преобразователей давления для тактильных датчиков, применяемых для диагностики при эндохирургии, запатентован [2]. В данной статье приведены результаты разработки и исследования новой конструкции матрицы из семи интегральных преобразователей давления МИПД-7 для тактильных механорецепторов эндоскопии, которые спроектированы и изготовлены с учетом замечаний и рекомендаций, полученных во время предыдущих исследований. Для ослабления



хирургического воздействия на организм человека уменьшен размер матрицы и число тензорезистивных преобразователей давления, имеющих повышенную чувствительность. Изготовленные эндоскопические тактильные механорецепторы прошли клиническое испытание в составе эндохирургической аппаратуры.

Кристалл МИПД-7 (рис. 1) имеет приближенную к кругу восьмиугольную форму, чтобы вписаться в диаметр 10 мм, для чего габаритный размер кристалла составляет 8 мм. Угловые скосы выполняют методом глубинного плазмохимического травления. Центры преобразователей давления расположены в узлах сетки с шагом по X = 2,15 мм и по Y = 2,25 мм. Кристалл МИПД-7 содержит 18 внешних выводов, которые расположены по 9 штук, вдоль двух сторон. Размер контактной площадки составляет $0,20 \times 0,20$ мм с шагом между ними 0,40 мм.

Металлическая одноуровневая разводка соединяет контактные площадки и отдельные преобра-



зователи давления МИПД-7 в соответствии с принципиальной электрической схемой, показанной на рис. 2.

По конструкции кремниевые мембраны преобразователей давления рассчитаны на применение в диапазоне давлений 0...35 кПа, с чувствительностью 0,4...0,7 мВ/В/кПа и номиналом сопротивлений тензорезистивного моста 13,5 \pm 2 кОм. Для контроля температуры кристалла используются транзисторы, включенные по диодной схеме VD1, VD2.

Исходным материалом является кремниевая подложка КЭФ-4,5 (100) с двусторонней полировкой, в которой методами объемной микрообработки и интегральных схем создаются плоские мембраны, диффузионные области тензорезисторов и p+ выводов, а также алюминиевые шины и контактные площадки. Технология изготовления МИПД-7 состоит из 10 фотолитографических циклов, один из которых выполняется по обратной стороне кремниевых пластин, где анизотропным химическим травлением изготавливаются кремниевые

мембраны толщиной около 20 мкм. Совмещение мембран, сформированных на обратной стороне пластин, с тензорезисторами на лицевой стороне осуществляется на установке двухстороннего совмещения по специальным технологическим меткам. Далее, для последовательного совмещения технологических слоев используют стандартные фигуры совмещения. Каждый отдельный элемент в кристалле матрицы МИПД-7 выполнен интегральным способом с идентичными параметрами. Конструкция имеет симметричное расположение тензорезисторов на мембране в местах ее максимальной деформации. Расположение контактных площадок дает возможность осуществлять разварку выводов с контактных площадок матрицы на переходную плату, используя стандартное технологическое оборудование.

Разработанная конструкция матрицы ЧЭ давления была промоделирована с помощью программы ANSIS в целях исследования влияния механических воздействий на распределение механических напряжений в конструкции и определения уровня выходного сигнала.

В результате моделирования получены графики зависимости выходного сигнала с матрицы ЧЭ давления (рис. 3). На рисунке приведены выходные характеристики ЧЭ с толщиной мембраны 20 мкм в зависимости от температуры –40; 20; 80 °C при номинальном давлении 0,1 МПа. Напряжение выходного сигнала остается линейным во всем рабочем температурном диапазоне. Проведенный расчет показал, что напряжение выходного сигнала для ЧЭ в матрице с плоской кремниевой мембраной 20 мкм и сопротивлением тензорезисторов 10 кОм имеет значение на уровне 50 мВ при номинальном давлении 0,1 МПа и напряжении питания 5 В. Расчетная температурная зависимость передаточной



Рис. 3. Графики зависимости выходного сигнала ЧЭ от давления при температуре $-40\ ^\circ C...80\ ^\circ C$ по результатам моделирования

характеристики чувствительности кристалла матрицы ЧЭ давления имеет значение 2,6 %/10 °С. Нелинейность передаточной характеристики кристаллов МИПД-7 имеет расчетное значение 0,18 % при 20 °С и номинальном давлении 0,1 МПа. Расчетное значение деформации тонкой кремниевой мембраны имеет симметричный характер и достигает 6 мкм.

Готовые пластины с кристаллами измеряли на зондовой установке с помощью автоматического измерительного комплекса АИКТЕСТ. Результаты измерений начального смещения — нулевого сигнала тензорезистивного моста имеют основное значение в диапазоне —9,3...2,18 мВ/В для напряжении питания 3,3 В. Выход годных кристаллов с пластины составляет более 80 %. На кремниевой пластине диаметром 100 мм расположено 127 кристаллов МИПД-7.

Матрица МИПД-7 установлена на основании с отверстиями, через которые передается давление. Основание изготовлено методами производства многоуровневых многослойных печатных плат. За матрицей крепится схема обработки сигналов с тензорезистивных мостов. Детали устройства показаны на рис. 4 при Ø 10 мм.

Датчик осязания изготавливался на основе семиканальной матрицы ЧЭ давления. Каждый ка-



Рис. 4. Фотография сборки МИПД-7 в узел обработки для измерения локальных давлений



Рис. 5. Тактильный датчик на основе МИПД-7

нал в матрице ЧЭ давлений является независимым измерительным каналом и преобразует внешнее тактильное воздействие, возникающее за счет механического воздействия при соприкосновении датчика с каким-либо предметом, в электрический сигнал. Тензорезисторы ЧЭ расположены над тонкой кремниевой мембраной и соединены по схеме моста Уинстона. Основное назначение датчика осязания связано со съемом информации о распределении плотности исследуемого объекта и передачи информации на устройство отображения. Тактильный датчик используется в составе эндоскопического аппарата для пальпации внутренних органов пациентов и для дистанционной имитации тактильных ощущений.

В ходе работы разработан и изготовлен матричный тензочувствительный тактильный датчик (рис. 5).

На основе результатов проведенных исследований можно сделать вывод о том, что матрицы ЧЭ давлений полностью удовлетворяют требованиям по чувствительности и надежности.

Основные характеристики тактильного да	тчика:
напряжение питания	3,3 B
число каналов измерения давления	7
верхний диапазон измерения давления	100 кПа
точность	1 %
тип интерфейса для связи с внешними	
устройствами (условное наименование)	UART
рабочий диапазон температур	+5+50 °C

Разработана и исследована новая конструкция кристаллов матриц ЧЭ давлений МИПД-7 для тактильных датчиков на основе плоских кремниевых мембран. Тактильные датчики на основе матриц ЧЭ давления прошли полный цикл клинических испытаний в составе эндохирургической аппаратуры. Развитие тактильной диагностики на основе эндоскопических тактильных матриц преобразователей давления с большой вероятностью приведет к широкому внедрению эндохирургии для лечения социально значимых заболеваний в медицинскую практику нашей страны [3] и других развитых стран. Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2008—2015 годы" (ГК № 16.513.11.3001). Исследования проводились с использованием оборудования ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" на базе НПК "Технологический комплекс". Деятельность ЦКП осуществляется при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. Амеличев В. В., Буданов В. М., Гусев Д. В., Соколов М. Э., Суханов В. С., Тихонов Р. Д. Разработка и создание опытных образцов искусственных тактильных механорецепторов для эндоскопии // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 2. С. 30–33.

2. Патент № 2362236 "Матрица интегральных преобразователей давления" / В. В. Амеличев, В. М. Буданов, Д. В. Гусев, М. Э. Соколов, В. С. Суханов, Р. Д. Тихонов. Приоритет от 27.12.2007.

3. Садовничий В. А., Григорьев А. И., Окунев Ю. М., Соколов М. Э. Буданов В. М., Мартыненко Ю. Г. Искусственный тактильный механорецептор. Теория, опыт создания, экспериментальная апробация // Технология живых систем. 2005. Т. 2, № 4—5. С. 3—10.

Материаловедческие и технологические основы МНСТ

УДК 621.79

С. В. Гетьман¹, студентка, e-mail: sofia.getman@gmail.com, C. А. Алексеев², канд. хим. наук, нач. отдела, B. В. Пинаев², канд. техн. наук, нач. сектора, C. В. Дзюбаненко², аспирант¹, нач. сектора, ¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург ² ОАО "Авангард", г. Санкт-Петербург

ТЕХНОЛОГИЯ КОРПУСИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛА ПАВ-МЕТКИ ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ АВТО-И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Поступила в редакцию 24.05.2012

Проанализированы современные технологии монтажа и корпусирования ПАВ-меток, а также показаны современные подходы к технологии соединения разнородных материалов клеем.

Ключевые слова: монтаж, клеевые соединения, ПАВ-метка

В связи со стабильным ростом внешнеторговых показателей и внутреннего потребительского спроса и, как следствие, с увеличением грузо- и товарооборота в России за последние годы наблюдается повышенная востребованность железнодорожных грузовых и автоперевозок. Поэтому в настоящее время одной из приоритетных задач являются разработка и внедрение систем радиочастотной идентификации на железнодорожном транспорте и автотранспорте [1—4].

Основной задачей данной работы является обоснование путем сравнительного анализа наиболее технологичного метода монтажа и корпусирования метки на поверхностных акустических волнах (ПАВ) для систем радиочастотной идентификации для высокоскоростного железнодорожного и автомобильного транспорта.

В настоящее время разработчики стали использовать перспективные полимерные и нанокомпозитные материалы для монтажа твердотельной электроники, в том числе и кристаллов [5, 6]. В то же время по информации источников [7—9] некоторые разработчики продолжают совершенствовать процесс пайки.

В состав системы радиочастотной идентификации транспортных средств на ПАВ входят следующие основные компоненты:

- идентификатор-метка (ПАВ-метка), устанавливаемый на транспортном средстве;
- считыватель данных с идентификатора.

Согласно ГОСТ 16962—71 "Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний" учитываются допустимые условия эксплуатации данного изделия:

- температура окружающей среды от -50 до +70 °C;
- относительная влажность окружающей среды 100 % при 40 °C;
- воздействие дождя, солевого (морского) тумана, пыли и песка;
- покрытие слоем сажи, нефти или мазута до 1 мм;
- воздействие случайной вибрации;
- атмосферное давление от 630 до 800 мм рт. ст.

Изделия должны быть устойчивыми и прочными к воздействию синусоидальных вибраций высокой частоты (с частотой перехода от 57 до 62 Гц).

Изделия, подвергаемые в условиях эксплуатации многократным или одиночным механическим ударам, должны быть устойчивыми и (или) прочными к их воздействию.

Согласно ОСТ 32.146—2000 "Аппаратура железнодорожной автоматики, телемеханики и связи" устанавливается классификация по устойчивости и прочности в условиях воздействия механических нагрузок и климатических факторов при применении по назначению. Данные изделия относятся к классам ММ1, К6 и К4.1. Для класса ММ1 характерны:

- диапазон частот от 5 до 150 Гц;
- амплитудное значение ускорения g в вертикальном и горизонтальном направлениях воздействия 0,1 м/с²;
- длительность действия ударного ускорения в горизонтальном направлении воздействия от 1 до 3 мс при многократных ударах и от 10 до 30 мс при одиночных.

К классам К6 и К4.1 предъявлены такие требования, как вибростойкость, смена температур, сухая и влажная теплота, холод.

Диапазон рабочих температур конечного устройства, как правило, определяется свойствами применяемых в нем материалов. Наличие фазовых переходов, термического разложения, ухудшения механических и электродинамических свойств с ростом температуры и т. д. — все это значительно ограничивает диапазон температур применения классических материалов радиоэлектроники. В нашем случае ПАВ-метка выполняется на несущем корпусе, внутри которого размещена патч-антенна и чип ПАВ-метки. Для изготовления данного кристалла ПАВ-метки применяют пьезопластины ниобата лития, подверженные таким основным операциям, как фотолитография, жидкостное травление, вакуумное напыление. Схема крепления кристалла ПАВ-метки на основание корпуса изображена на рис. 1.

Как показано на рис. 1, кристалл прикрепляется к основанию корпуса с помощью клея. Основные требования к соединению кристалла и основания в соответствии с требованиями вышеперечисленных





нормативных документов к данному изделию следующие:

- минимальное газовыделение вещества, осуществляющего соединение (например, компонентов клея);
- высокая упругость и прочность соединения.

Надежность крепления кристалла характеризуется механической прочностью соединения, согласованием температурного коэффициента линейного расширения и отвода теплоты из-за больших токовых нагрузок.

Возможные методы крепления кристалла можно разделить на клеевые соединения и пайку. Для клеевых соединений мы рассмотрим различные органические марки клея.

Основой клея является полимер, обладающий хорошей адгезией. Рабочие температуры клеевых соединений зависят от их состава и обычно варыируются от -60 до +150 °C, также стоит отметить повышенную устойчивость к вибрациям.

В состав клея входят:

- термореактивный полимер, который при взаимодействии с отвердителем уже не переходит обратно в вязкотекучее состояние;
- отвердитель, который вступает в реакцию с полимером как при комнатной температуре, так и при нагреве;
- наполнитель, выбор которого влияет на механическую прочность соединения (SiO₂, Al₂O₃, C увеличивают прочность соединения), температурный коэффициент линейного расширения, линейную усадку и отвод теплоты.

Рекомендуемые к применению марки органического клея для крепления ПАВ-кристалла, в том числе и метки, приведены в таблице.

Прочность клеевого соединения зависит от способа подготовки поверхностей. Выбор марки клея, технологии склеивания и дополнительной термической обработки компонентов клея определяется размерами и материалом склеиваемых деталей, качеством сопрягаемых поверхностей, техническими требованиями к соединению, свойствами клея.

Стоит отметить, что высокотемпературное отверждение клея образует более надежное и долговечное соединение за счет более равномерного сшивания смол.

В случае применения клея для монтажа ПАВметки в корпус могут возникнуть следующие отрицательные факторы:

- неравномерность толщины слоя клеевого соединения между чувствительным элементом и подложкой, что может привести к разбалансу рабочей частоты;
- обычно такое соединение не является вакуумплотным;
- рассогласование температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) материалов;
- пластичность соединения.

Технические	характеристики	некоторых	марок клеев і	по ОСТ В	6-06-5100-96
"Клеи	полимерные мод	цифицирован	нные. Технич	еские треб	ования"

Марка	Полимер	Наполнитель	Рабочие температуры, °С	Способ отверждения	Особенности
BK-3	Фенолокаучуковая смола	C, Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	От -60 до +200	Отверждение возможно при повышенной темпера- туре без введения отверди- телей (горячий способ) и при нормальной темпера- туре (1517 °C) с отверди- телями (холодный способ)	Используется с подслоем- грунтом, стойкий к высо- ким температурам
ВК-9	Эпоксидная смо- ла, полиамидная смола, кремний- органические соединения	Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ , BN, TiO ₂	От —196 до +125	Отверждение возможно при повышенной темпера- туре без введения отверди- телей (горячий способ) и при нормальной темпера- туре (1517 °C) с отверди- телями (холодный способ)	Предназначается для кле- евых, клеесварных и клее- резьбовых соединений из стали, алюминиевых, маг- ниевых и титановых спла- вов, неметаллических ма- териалов в конструкциях
K-300-61	Эпоксикрем-	BN, TiO ₂	От —196 до +300	Отверждение 20°С 1 сутки, + 80°С — 4 ч	Применяется для герме- тичного склеивания ста- лей, алюминиевых и тита- новых сплавов, латуни, асбо- и стеклотекстоли- тов, керамики, пеноплас- тов, графита. Рекомендо- ван для применения в из- делиях авиационной и космической техники
K-400	нийорганическая смола, аминный отвердитель	BN, TiO ₂	От —196 до +400 (минуты), при +200 — до 1000 ч	Отверждение 2025 °C 1 сутки +8085°С 5 ч	Применяется для клеевого соединения сталей раз- личных марок, алюминие- вых и титановых сплавов, латуни, керамики, графи- та, ситалловых материалов
ВТ-10 (криосил)		BN, TiO ₂	От -269 до +200	Нет данных	Применяется для клеевого соединения сталей раз- личных марок, алюми- ния, латуни, керамики, стекла, стеклотекстолитов

Необходимо учитывать основное правило при проектировании неразъемных соединений: разница ТКЛР применяемых материалов не должна отличаться более чем в 1,5 раза. Таким образом, в приведенном случае клей ВК-9 нельзя применять для склеивания ПАВ-метки в связи с его низкой надежностью, с большой вероятностью разрушения такого соединения. Также из опыта применения клея ВК-9 известно, что в течение длительного времени он "газит" (выделяет пары компонентов клея) при циклической работе в диапазоне 0...120 °С.

По результатам исследований вариантов соединений наиболее приемлемым является установка кристалла ПАВ-метки на основание корпуса ТО-39 с помощью клея Delobond (рис. 2). Эпоксидный клей, характеристики которого были получены по результатам тестирования компанией DELO:

- рабочие температуры: при 24-часовой работе +120 °C, 96-часовой работе от +85 °C до -40 °C;
- тестирование на изменение температур в 10 циклах от -40 °С до +85 °С (цикл 0,5 ч);
- испытание на виброустойчивость проходили в течение часа по осям x, y и z с амплитудой 1,5 мм с частотой от 10 до 55 Гц.



Рис. 2. ПАВ-метка, смонтированная в корпус ТО-39



Рис. 3. Разваренный кристалл



Рис. 4. Герметизированный кристалл

Основным преимуществом этого клея является минимальная газация, обусловленная полным отверждением под воздействием ультрафиолетовых лучей в течение определенного времени. За это время клей отвердевает по всей толщине. За счет полного отверждения слоя клея минимизируется вероятность возможного газовыделения компонентов клея, при этом само соединение обладает достаточной упругостью.

После монтажа кристалла проводится разварка соединительных проводников. Используется автомат присоединения выводов К & S iConn. Разварка выполняется в автоматическом режиме по ранее отработанной программе золотой проволокой диаметром 40 мкм. Внешний вид разваренного кристалла показан на рис. 3.

Изделия предварительно проходят сушку в печи отжига и помещаются через шлюз в рабочую камеру, заполненную азотом. Далее изделия помещаются в оснастку и проводится герметизация аргоном, при которой вытесняется кислород, способствующий процессу газации клея.

В соответствии с операционной картой выполняется герметизация конденсаторной сваркой. Выбор такого вида сварки объясняется довольно высокой точностью в сравнении с прочими способами, а также скоростью сварки. Энергия, необходимая для расплавления металла, действует точно в нужных местах, не способствует расплавлению и деформации детали и является более щадящей к напылению или покрытию обрабатываемого материала по сравнению с любым другим видом сварки. При герметизации конденсаторной сваркой используется установка Муасhi P1000. Загерметизированная метка схематично показана на рис. 4. Контроль герметичности проходит в два этапа. На первом этапе выполняется контроль герметичности на малые течи. На втором этапе проводится контроль герметичности вакуумно-жидкостным методом с помощью установки тестирования TrioTech.

Выводы

- Замена любого типа соединений склеиванием уменьшает массу конструкции, позволяет соединить почти любые материалы, упрощает процесс сборки.
- По сравнению с другими способами соединения достоинство клеевого соединения состоит в равномерности распределения механических напряжений по шву.
- В зоне соединения при склеивании не возникает коррозия, в большинстве случаев эти соединения непроницаемы для паров, жидкостей, герметичны, поглощают вибрации (снижают шум).
- Установлено, что технологический процесс склеивания является наиболее гибким, технологичным, относительно дешевым, а также не уступает по качеству соединения разнородных материалов другим методам.
- По результатам исследовательских испытаний выбран тип фотоклея (DELO-photobond) для обеспечения надежной конструкции, упругого соединения и минимизации процесса газации компонентов клея.

Список литературы

1. Аналитический бюллетень / Тенденции российской экономики. Итоги 2011 года" РИА-Аналитика / Центр экономических исследований. М.: РИА Новости, 2012. 33 с.

2. Пасынков В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1986. 367 с.

3. Шубарев В. А. Технологические прорывы в создании радиоэлектронной аппаратуры // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. Спецвыпуск, октябрь, 2008. С. 4—8.

4. **Иванов Н. Н., Казак А. В.** Развитие технологии монтажа ЭКБ на печатные платы на современном этапе // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. Спецвыпуск, октябрь, 2008. С. 36—41.

5. Козырев А. А., Горин Д. А., Кособудский И. Д., Микаелян Г. Т. Перспективы использования полимерных и нанокомпозитных материалов в твердотельной электронике // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 3. С. 9–23.

6. Богинская И. А., Гусев А. В., Маилян К. А., Мешков А. С., Пебалк А. В., Рыжиков И. А., Чвалун С. Н. Полимерные пленки на основе поли-п-ксилилена для применения в микро- и оптоэлектронике // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 5. С. 17—22.

7. Штенников В. Н. Оценка времени и температуры пайки электронных приборов // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 5. С. 15—17.

8. Штенников В. Н. Методика обеспечения требуемой температуры контактной пайки // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 7. С. 30–32.

9. Штенников В. Н. Влияние длины паяльного стержня на температуру контактной пайки // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 3 С. 29—31.

10. Григорьев И. С., Мейлихов Е. З. Физические величины: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.

А. А. Антипов, ассистент кафедры,
С. М. Аракелян, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф.,
С. В. Кутровская, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб.,
А. О. Кучерик, канд. физ.-мат. наук, доц.,
А. А. Макаров, магистр,
А. В. Осипов, аспирант,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых",
С. П. Зимин, д-р физ.-мат. наук, проф., проректор,
Государственное образовательное учреждение

Высшего профессионального образования "Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова",

e-mail: arak@vlsu.ru, kucherik@vlsu.ru

ЛАЗЕРНОЕ ПОЛУЧЕНИЕ КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМ ИЗ НАНОЧАСТИЦ ХАЛЬКОГЕНИДОВ СВИНЦА И ИХ ОСАЖДЕНИЕ НА ПОДЛОЖКУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАПЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Поступила в редакцию 13.06.2012

Представлены результаты по лазерному получению полупроводниковых наночастиц при непрерывном лазерном воздействии ближнего ИК диапазона (до 10⁶ Bm/cm²) на массивный образец PbX в жидкости. Для высадки квантовых точек PbX на подложку рассмотрен метод капельного осаждения. С использованием имитационной модели описаны особенности формирования осажденного слоя в процессе испарения капли.

Ключевые слова: полупроводниковые частицы, коллоидный раствор, метод Монте-Карло

Введение

Полупроводниковые наночастицы получают все большее распространение в различных областях техники. Свойства наноразмерных частиц значительно изменяются по сравнению с массивным материалом. Наличие зависимости оптических свойств наночастиц от их размера открывает возможности для создания на их основе новых поколений солнечных батарей, лазеров, светодиодов и т. д. [1].

Болышинство исследований, связанных с изучением и применением полупроводниковых квантовых точек, относятся к материалам, имеющим оптические переходы в видимом диапазоне спектра [1, 2]. Лишь недавно в центре внимания оказались на-

нокристаллы халькогенидов свинца (PbS, PbSe, PbTe) — узкозонных полупроводниковых соединений с ширинами запрещенной зоны 0,41, 0,278 и 0,31 эВ при 300 К [2] с переходами, занимающими широкий диапазон ближней ИК области спектра (0,8...5 мкм). Малые значения ширины запрещенной зоны, большие значения боровского радиуса экситона (20...50 нм) приводят к тому, что нанокристаллы этих полупроводников обладают рядом уникальных оптических и электрических свойств, которые делают их перспективными для исследования физических явлений квантового пространственного ограничения и для приложений в нанофотонике ближнего ИК диапазона. Важной особенностью халькогенидов свинца является превышение энергии диссоциации молекул над энергией сублимации [3]. Поэтому в различных технологических процессах (испарение, плазменное распыление, радиационные воздействия и т. д.) молекулы бинарного соединения не распадаются и целиком участвуют в построении наноструктур и пленочных систем [4].

Главная проблема здесь — получение полупроводниковых наночастиц требуемого размера с высокой степенью однородности, т. е. с незначительным отклонением радиуса частиц от его среднего значения. Это возможно достичь методами получения наночастиц, основанными на осаждении вещества из его пересыщенного раствора [5—7].

Другой подход связан с лазерным синтезом наночастиц в жидкостях, который позволяет получать устойчивые коллоидные системы с характерными размерами 5...100 нм за счет варьирования интенсивностью и геометрией лазерного воздействия [8, 9]. В данных задачах применяются в основном источники лазерного излучения с короткой и ультракороткой длительностью импульсов [2]. В этом случае значительно повышается количество аблируемого материала, но вместе с тем и интенсифицируются химические процессы. Более того, в зоне воздействия образуется пробой, что приводит к неконтролируемому значительному увеличению разброса размеров частиц относительно среднего значения.

В данной работе предложен способ получения полупроводниковых наночастиц халькогенидов свинца со средними размерами 5...30 нм при воздействии непрерывного лазерного излучения ближнего ИК диапазона умеренной интенсивности (до 10^6 Bt/см²). Как показано в работах [10, 11], использование непрерывного лазерного излучения позволяет инициировать наноструктурирование полупроводников без специальных требований к условиям окружающей среды. Для испарения растворителя и размещения наночастиц на подложке использованы методы капельного осаждения, которые при изменении размеров капель и разницы температуры коллоидного раствора и подложки позволяют формировать осажденный слой с различной морфологией.

Технология формирования нанокристаллов

Лазерно-синтезированные наночастицы. Для получения коллоидных систем использовалась схема, предложенная в работах [8, 9]; при этом полупроводниковыми материалами служили кристаллы PbTe, PbS, а в качестве жидких сред брались:

- этанол (C₂H₅OH) плотность ρ = 789 кг/м³, вязкость ν = 1,22 · 10⁻³ кг/(м · с) при 180 °С;
- глицерин (C₃H₅(OH)₃) плотность ρ = 1261 кг/м³, вязкость ν = 1400 · 10⁻³ кг/(м · с) при 180 °С.

В наших экспериментах использовался источник непрерывного лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм, что соответствует кванту энергии фотона, значительно превышающего ширину запрещенной зоны используемых полупроводников.

Результаты синтеза наночастиц представлены в таблице.

Размеры образовавшихся частиц определялись с использованием анализатора размеров частиц Horiba LB-550, принцип работы которого основан на явлении динамического рассеяния света. Данный анализатор предназначен для измерения частиц в диапазоне от 3 нм до 6 мкм. Гистограмма распределения частиц по размерам при лазерном воздействии на кристалл PbTe в глицерине представлена на рис. 1. Приведены усредненные значения, рассчитанные на основе шести последовательных измерений частиц с разницей во времени между каждым измерением — одна минута. В процессе последовательных измерений не наблюдалось сдвига гистограммы распределения размеров частиц, что говорит, во-первых, о стабильности коллоидного раствора, и, во-вторых, о сферической форме образующихся наночастиц.

Результаты таблицы свидетельствуют, что во всех случаях в глицерине размеры получаемых наночастиц меньше, чем в этаноле. Таким образом, вязкость растворителя оказывает существенное влияние на кинетические процессы формирования нанокристаллов.

Характерные размерные масштабы. Физика образования квантовых точек на основе наночастиц халькогенидов свинца связана со значением бо-

Параметры лазерного воздействия (интенсивность <i>I</i> , время воздействия <i>t</i>)	Жидкая фаза	Мишень	Средний размер лазерно- синтезированных наночастиц <i>R</i> ₀ , нм
$I = 10^4 10^6$ Вт/см ² ; t = 1 мин	$C_3H_5(OH)_3$	PbS	518
	C ₂ H ₅ OH	PbS	626
	$C_3H_5(OH)_3$	PbTe	413
	C ₂ H ₅ OH	PbTe	630



Рис. 1. Диаграмма распределения наночастиц по диаметру после лазерного воздействия с интенсивностью 10^5 Bt/cm^2 на массивную мишень РbTe, помещенную в глицерин; N(d) — относительная доля частиц с размером d; f(N) — вклад каждого вида частиц в общую функцию распределения

ровского радиуса экситона a_B , который определяется в виде [12]

$$a_B = \hbar^2 \varepsilon / e^2 m^*,$$

где \hbar — постоянная Планка; ε — высокочастотная диэлектрическая постоянная материала; e — заряд электрона; m^* — эффективная масса экситона, вычисляемая через эффективные массы электронов m_e^* и дырок m_h^* :

$$1/m^* = 1/m_{\rho}^* + 1/m_{h}^*$$

Для халькогенидов свинца, имеющих большие значения высокочастотной диэлектрической постоянной и малые значения эффективных масс электронов и дырок, рассчитанный для изотропного случая боровский радиус экситона имеет большие значения, составляя для PbTe — 50 нм, для PbS — 18 нм.

Сравнение размеров получаемых частиц (см. таблицу) с боровским радиусом экситона показывает, что для нанокристаллов теллурида свинца выполняется строгое условие $R_0 < a_B$, в то время как для наночастиц сульфида свинца не всегда удается сформировать кристаллы меньше боровского радиуса экситона и $R_0 \leq a_B$. Проведенное сравнение позволяет говорить о том, что для наночастиц PbTe и нанокристаллов PbSe с малыми размерами реализуются условия размерного квантования, в результате чего электронные спектры квантовых точек халькогенидов свинца имеют энергетические зазоры, которые могут значительно превышать ширину запрещенной зоны объемного материала [13].

Таким образом, предлагаемый метод позволяет получать квантовые точки халькогенидов свинца при лазерном испарении массивных кристаллических мишеней в растворителе.

Осаждение нанокристаллов с использованием капельной технологии

Описание метода и АСМ-исследования поверхности. Особенность данного метода нанесения нанопокрытий связана с тем, что морфология осажденного слоя [14, 15] существенным образом зависит от свойств жидкого растворителя, размеров частиц коллоида, температуры капли и подложки и т. п.

В данной работе осаждалась капля коллоидного раствора из полупроводниковых частиц при комнатной температуре на поверхность подложки, нагреваемой от 20 до 100 °С. На рис. 2 представлено оптическое изображение испаренной капли при температуре 20 °С, осажденной на поверхность кварцевого стекла.

Во всех случаях осаждение имело ярко выраженную границу, стремящуюся к правильной геометрической форме. Как видно из рис. 3 (см. вторую сторону обложки), увеличение температуры подложки вызывает существенные изменения морфологии осажденного слоя.

Действительно, когда температуры подложки и капли коллоида одинаковы (20 °С), происходит активная миграция частиц к краям капли, но сравнительно медленная скорость испарения позволяет сформироваться границе осаждения с высотой 150 нм и характерной шириной 3 мкм.

Осаждение происходит преимущественно у границы капли; при этом частицы стремятся образовать протяженные нитевидные структуры на поверхности с характерным зерном порядка 100 нм. С увеличением температуры высота граничного слоя начинает возрастать и при температуре 100 °С составляет уже 500 нм с шириной ~5 мкм. При этом достигается более однородное осаждение — частицы оседают не только на границе, но и внутри испаряющейся капли, формируя второе кольцо осаждения. Осажденный слой является более плотным, но вы-



Рис. 2. Оптическое изображение осажденной капли при температуре подложки 20 °C



Рис. 4. Спектры комбинационного рассеяния, полученные с использованием Ar-лазера на длине волны 800 нм для теллурида свинца (a) и сульфида свинца (δ), осажденных на подложку

деляются отдельные островки размерами 1,5 мкм, состоящими из частиц размерами 50 нм.

Спектры комбинационного рассеяния осажденных пленок приведены на рис. 4. Эти данные получены при комнатной температуре на серийном комбинированном атомно-силовом микроскопе и конфокальном микроскопе комбинационного рассеяния Интегра-Спектра при воздействии первичного пучка аргонового лазера на длине волны 800 нм. Детальный анализ особенностей измеренных спектров при вариации условий осаждения будет описан в следующей работе. Сейчас важно отметить, что наблюдаемые пики вблизи 180 см^{-1} для PbTe и 150 см^{-1} для PbS соответствуют теоретически рассчитанным и экспериментально наблюдаемым значениям [16—18] для теллурида и сульфида свинца в кристаллическом и нанокристаллическом состояниях для 2LO(X) PbTe и LA(L) + TA(L) PbS. Это подтверждает, что при лазерном воздействии в жидкости происходит формирование наночастиц PbTe и PbS и их последующая высадка на подложку.

Для описания особенностей формирования осажденного слоя в процессе испарения капли была реализована имитационная модель, описанная ниже.

Модель образования осажденного слоя. При капельном осаждении наночастиц из коллоидного раствора процесс формирования осаждаемого слоя можно условно разбить на две фазы: растекание капли и испарение капли.

Динамику процесса растекания капли определяют следующие факторы: поверхностное натяжение, смачивание, вязкость, теплопроводность, ионные связи [18]. Таким образом, когда концентрация частиц в капле относительно мала, процесс растекания можно представить аналогично случаю изотропной среды.

В процессе падения с высоты *h* капля запасает потенциальную энергию

$$W = mgh$$
,

где *m* — масса капли; *g* — ускорение свободного падения.

Массу капли можно определить из условия равновесия

$$\sigma = mg/\pi d,$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; *d* — внутренний диаметр капилляра.

Данная энергия будет расходоваться на увеличение поверхностной энергии ΔE капли и образование молекулярных связей с поверхностью Q [17].

Изменение поверхностной энергии можно описать в виде

$$\Delta E = \sigma \pi \Big(R_{\rm K}^2 - 2d^2 \Big),$$

где $R_{\rm K}$ — радиус основания капли.

Образование молекулярных связей с поверхностью определяется как [18, 19]:

$$Q = \frac{\Delta Q \pi R_{\rm K}^2}{k \gamma a^2}$$

где ΔQ — энергия активации одной связи; k — коэффициент шероховатости поверхности подложки; γ — степень покрытия частицами площади основания капли (0 < $\gamma \le 1$); a — площадь, приходящаяся на одну связь (~10⁻⁹ м).

Тогда радиус капли можно определить как

$$R_{\rm K} = \sqrt{mgh + 2\sigma\pi d^2/\sigma\pi + \frac{\Delta Q}{k\gamma a^2}}.$$

Это значение будет стремиться к максимуму при $\gamma \rightarrow 1$ за счет образования все большего числа связей с поверхностью подложки [19].

Время испарения капли можно определить, используя уравнение Максвелла для капель малых размеров [20—22]:

$$dm/dt = 4\pi R_{\rm K} DM(p_{\rm K} - p_{\rm T})/RT,$$

где *R* — универсальная газовая постоянная; *D* — коэффициент диффузии; *p*_к — парциальное давле-

ние над каплей; p_{Π} — парциальное давление над плоской поверхностью.

Используя формулу Томсона, определяющую давление насыщенного пара

$$\ln\left(\frac{p_{\rm K}}{p_{\rm II}}\right) = \frac{2\sigma M}{\rho R T R_{\rm K}},$$

где ρ — плотность жидкости, можно определить время испарения капли t_{μ} с помощью выражения [2]

$$t_{\rm H} = R_{\rm K}^2 / \frac{2MDp_{\rm II}}{RT\rho} \left[\exp\left(\frac{2\sigma M}{\rho RTR_{\rm K}}\right) - 1 \right].$$

Время растекания составляет, как правило, 10...100 мкс, в то время как испарение может занимать от десятков секунд до десятков минут в зависимости от вида используемого растворителя, поэтому перемещениями частиц на этапе растекания можно пренебречь и считать их равномерно распределенными в объеме капли.

Таким образом, модель процесса осаждения наночастиц содержит следующие этапы:

определение максимально возможных размеров капли;

2) расчет времени испарения капли;

 наложение сетки, определяющей передвижение частиц в расчетной области;

4) задание линейной скорости смещения границ капли;

5) определение относительной подвижности частиц;

6) движение и осаждение частиц.

В качестве метода моделирования процесса движения и осаждения частиц был выбран кинетический метод Монте-Карло (КМК), эффективно используемый для компьютерного моделирования физических систем на атомарном уровне при исследовании многих технологических процессов нанесения покрытий, таких как молекулярно-лучевая эпитаксия, плазменное осаждение и травление, магнетронное напыление и др. [23].

В нашей задаче частицы в начальный момент времени (после растекания капли) считаются равномерно распределенными в объеме капли. Частицы совершают движение по узлам расчетной сетки в методе КМК; условная начальная скорость частиц определяется через тепловую энергию:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT$$

и нормируется с использованием коэффициента подвижности:

$$u=\frac{1}{6}\pi\nu r',$$

где v — вязкость жидкости; *r*' — радиус наночастицы.

Частица считается закрепившейся на поверхности, если при движении по сетке достигает границы расчетной области и при этом ее кинетическая энергия меньше, чем энергия активации связи.

На рис. 5 (см. вторую сторону обложки) приведены полученные по данной процедуре изображения осажденных частиц при различных температурах подложки и капли коллоида.

Таким образом, результаты моделирования (рис. 5) соответственно согласуются с данными, полученными в эксперименте (см. рис. 3).

Заключение

В данной работе представлены результаты по лазерному синтезу полупроводниковых наночастиц халькогенидов свинца. Для получения наночастиц использовался метод лазерного испарения в жидкости. Предложенный способ получения наночастиц при воздействии непрерывного лазерного излучения показал, что получаемые наночастицы по своим геометрическим свойствам могут являться квантовыми точками. Для формирования осажденного слоя, состоящего из квантовых точек, рассмотрен метод капельного осаждения. Продемонстрировано, что данный метод позволяет получать структуры с различной морфологией, зависящей от температуры подложки. В дальнейшем будет проведено изучение оптических и электрофизических свойств полученных структур, что важно для их использования в устройствах оптоэлектроники и фотоники.

Работа частично поддержана грантами в рамках ФЦП "Развитие научного потенциала высшей школы" ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007—2013 годы" ГК № 16.518.11.7030, а также грантом РФФИ 12-02-90419-Укр_а.

Список литературы

1. Васильев Р. Б., Дирин Д. Н., Гаськов А. М. Полупроводниковые наночастицы с пространственным разделением носителей заряда: синтез и оптические свойства // Успехи химии. 2011. № 80 (12).

2. Баранов А. В., Богданов К. В., Ушакова Е. В., Черевков С. А., Федоров А. В., Tscharntke S. Сравнительный анализ спектров комбинационного рассеяния макро- и нанокристаллов PbS // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 109, № 2. С. 301—305.

3. Абрикосов Н. Х., Шелимова Л. Е. Полупроводниковые материалы на основе соединений А4В6. М.: Наука, 1975. 195 с.

4. Zimin S. P., Amirov I. I. and Gorlachev E. S. RF sputtering of epitaxial lead chalcogenide films in argon and krypton plasma // Semicond. Sci. Technol. 2011. 26. 6 p.

5. **LaMer V. K., Dinegar R. H.** Theory, Production and Mechanism of Formation of Monodispersed Hydrosols // J. Am. Chem. Soc. 1950. V. 72. P. 4847–4854.

6. Kotlarchyk M., Chen S.-H., Huang J. S. Temperature dependence of size and polydispersity in a three-component microemulsion by Small-Angle Neutron Scattering // J. Phys. Chem. 1982. V. 86. P. 3273–3276.

7. Fletcher P. D. I., Howe A. M., Robinson B. H. The Kinetics of Solubilisate Exchange between Water Droplets of a Water-in-oil Microemulsion // J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1. 1987. V. 83. P. 985–1006.

8. Симакин А. В., Воронов В. В., Шафеев Г. А. Образование наночастиц при лазерной абляции твердых тел в жидкостях // Тр. Ин-та общей физики им. А. М. Прохорова. 2004. Т. 60.

9. Казакевич П. В., Воронов В. В., Симакин А. В., Шафеев Г. А. Образование наночастиц меди и латуни при лазерной абляции в жидкости // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, № 10. С. 951—956.

10. Антипов А. А., Аракелян С. М., Емельянов В. И., Зимин С. П., Кутровская С. В., Кучерик А. О., Прокошев В. Г. Образование ансамбля наночастиц с бимодальным распределением по размерам при воздействии непрерывного лазерного излучения на пленки РbTe // Квантовая электроника, 2011. № 41. С. 735.

11. Антипов А. А., Аракелян С. М., Емельянов В. И., Зимин С. П., Кутровская С. В., Кучерик А. О., Прокошев В. Г. // Образование кольцевых периодических структур рельефа поверхности при непрерывном лазерном облучении тонких пленок PbSe // Квантовая электроника, 2011. № 41. 441 с.

12. Зимин С. П., Горлачев Е. С. Наноструктурированные халькогениды свинца. Ярославль: Изд-во ЯрГУ, 2011. 231 с.

13. Wise F. W. Lead salt quantum dots: The limit of strong quantum confinement // Acc. Chem. Res. 2000. V. 33. P. 773–780.

14. Waldvogel J. M., Polikakos D. Solidification phenomena in picoliter size solder droplet dispertion on composite substrate // J. Intern. Heat. Mass Transfer. 1997. V. 40, N 2. P. 295–309.

15. Молчанов С. П., Лебедев-Степанов П. В., Алфимов М. В. Влияние температуры подложки на самосборку частиц в испаряющейся капле коллоидного раствора // Российские нанотехнологии. 2010. № 5. Т. 9–10. С. 61–66.

16. Белогорохов А. И., Белогорохова Л. И., Хохлов Д. Р., Лемешко С. В. Смешанные оптические моды колебаний в нанокристаллитах PbTe // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36. № 6.

17. Ovsyannikov S. V., Ponosov Y. S., Shchennikov V. V., Mogilenskikh V. E. Raman spectra of lead chalcogenide single crystals // Phys. stat. sol. 2004. V. 1, N 11. P. 3110–3113.

18. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. 568 с.

19. Бородин С. А. Исследование процесса растекания капли жидкости, наносимой на поверхность подложки // Компьютерная оптика. 2005. В. 28. С. 66—69.

20. Фукс Н. А. Испарение и рост капель в газообразной среде // Итоги науки, 1958. С. 90.

21. Резибуа П., Де Ленер П. Классическая кинетическая теория жидкостей и газов. М.: Мир, 1980.

22. Кудряшова О. Б., Ворожцов Б. И. Математическая модель взрывной генерации жидкокапельных аэрозолей // Изв. Томского политехнического университета, 2011. Т. 318, № 2. С. 77-81.

23. Булгаков А. В., Булгакова Н. М., Бураков И. М. и др. Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2009. 462 с.

Элементы МНСТ

УДК 621.3.049.77.002.5

В. П. Драгунов, д-р техн. наук, нач. отдела, **В. Ю. Доржиев**, аспирант, Новосибирский государственный технический университет, e-mail: drag@adm.nstu.ru, b.dorzhiev@gmail.com

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР НА ОСНОВЕ ДУПЛИКАТОРА БЕННЕТА

Поступила в редакцию 16.05.2012

Проведен анализ работы электростатического генератора на основе дупликатора Беннета. Оценена эффективность его функционирования в качестве устройства подзаряда перезаряжаемого химического источника питания с учетом обратных токов диодов. Определены критические значения основных характеристик компонентов генератора.

Ключевые слова: микромощный генератор, извлечение энергии из окружающей среды, преобразование механической энергии в электрическую, электростатический преобразователь энергии

Введение

Современный уровень развития информационной техники и прогресс в области производства микросхем привели к возможности создания нового класса распределенных коммуникационных систем — беспроводных сенсорных сетей (БСС).

Важным элементом БСС является источник питания. Его выбор основывается на сопоставлении удельной энергии и удельной мощности источника, приведенной к единице массы, объема или площади источника. В настоящее время в качестве источника питания чаще всего используются ионно-литиевые перезаряжаемые батареи, т. е. химические элементы. Однако ограниченная емкость химических элементов приводит к необходимости в периодическом обслуживании — их замене или подзаряду.

Существенного увеличения продолжительности работы беспроводного сенсора без обслуживания можно добиться путем дополнения источника питания устройством его подзаряда (электрическим генератором), извлекающим энергию из окружающего пространства непосредственно на месте расположения сенсора. Источниками энергии в этом случае могут служить: солнечный свет, электромагнитное излучение, потоки жидкостей и газов, перепады давления и температуры, механические колебания и т. д. Причем, как показывает анализ, наиболее перспективным источником представляются механические колебания.

Энергия механических колебаний может быть преобразована в электрическую различными способами, однако наиболее широкое распространение получили: пьезоэлектрический, электромагнитный, электростатический. Ввиду совместимости технологии изготовления электростатических генераторов с технологией микроэлектроники в большинстве случаев предпочтение отдается именно электростатическим микроэлектромеханическим (МЭМ) генераторам.

К основным недостаткам большинства описанных в литературе электростатических МЭМ генераторов можно отнести [1—3]:

- необходимость синхронизации работы ключей с фазами механических колебаний;
- наличие индуктивного элемента и необходимость в схемах управления, потребляющих энергию.

В работе [4] предложена схема электростатического генератора на основе дупликатора Беннета, лишенная вышеперечисленных недостатков. Авторами был проведен анализ работы схемы, однако при этом не учитывались обратные токи диодов, что, на наш взгляд, может приводить к существенному расхождению теории с практикой, особенно при обратных токах, сравнимых со средним током подзаряда источника питания.

Целью данной работы является анализ работы МЭМ генератора на основе дупликатора Беннета с учетом обратных токов диодов и оценка критических значений основных характеристик компонентов генератора.

Модель

Электрическая схема генератора на основе дупликатора Беннета представлена на рис. 1. Ключевым элементом этого генератора является переменный конденсатор, выступающий в роли преобразователя энергии. Его основной характеристикой является коэффициент модуляции емкости $\eta = C_{\rm max}/C_{\rm min}$, где $C_{\rm max}$ и $C_{\rm min}$ — максимальная и минимальная емкости соответственно. В данной работе будем полагать, что модуляция емкостей C_1 и C_2 (рис. 1) осуществляется за счет изменения межэлектродного зазора. При запуске генератора (при подключении источника V_0) конденсатор C_1 предварительно заряжается по цепи: источник питания V_0 — конденсатор C_1 — диод D_2 . Затем, уже после одного цикла работы схема переходит в установившийся режим.

В установившемся режиме в работе данного генератора можно выделить два этапа. На первом этапе (работает контур a, рис. 1) за счет энергии внешних механических колебаний емкость конденсатора C_1 уменьшается, а C_2 увеличивается. При этом C_1 разряжается, а через источник питания и конденсатор C_2 течет ток подзаряда. На втором этапе (работает контур δ , рис. 1) — емкость конденсатора C_2 уменьшается, а C_1 увеличивается. При этом C_2 через диод D_1 разряжается в C_1 . В результате схема возвращается в исходное состояние. Затем цикл генерации повторяется.

Система уравнений, описывающих поведение рассматриваемого генератора, может быть представлена в виде

$$\frac{dq_1}{dt} = I_{D2} + I_{D1} - I_{D3}; \tag{1}$$

$$\frac{dq_2}{dt} = I_{D3} - I_{D1},$$
 (2)

где q_1 и q_2 — заряды на обкладках конденсаторов C_1 и C_2 ; I_{D1} , I_{D2} и I_{D3} — токи диодов D_1 , D_2 и D_3 соответственно.

При анализе токи диодов рассчитывались с использованием выражения

$$I_D = I_S \left(\exp\left(\frac{U_D}{m\varphi_{\rm T}}\right) - 1 \right), \tag{3}$$

где I_S — обратный ток насыщения; U_D — напряжение на диоде; m — коэффициент неидеальности; $\varphi_{\rm T} = k_{\rm B}T/q$ — температурный потенциал ($k_{\rm B}$ — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, q — заряд электрона). В расчетах полагали, что $I_S = 3 \cdot 10^{-9}$ А, а m = 1,82. Данные значения были получены из анализа вольт-амперных характерис-



Рис. 1. Электрическая схема МЭМ генератора на основе дупликатора Беннета



Рис. 2. Схематичное изображение конструкции двухконденсаторного преобразователя:

1 и 2 — неподвижные электроды; 3 — подвижный электрод

тик (BAX) кремниевых диодов 1N4004 с малыми токами утечки. Эти же диоды использовались и в дальнейших экспериментах.

На рис. 2 приведено схематичное изображение конструкции двухконденсаторного преобразователя.

Учитывая результаты [5—7], для данной конструкции преобразователя, при отношении b/d >50 (b — ширина электрода, d — межэлектродный зазор) будем полагать, что емкости конденсаторов C_1 и C_2 могут быть найдены с помощью формулы емкости идеального плоского конденсатора:

$$C_1 = C_0/(1-z);$$

$$C_2 = C_0/(1+z); \ C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon S/d$$

где *S* — площадь электрода; ε_0 — электрическая постоянная; ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды между электродами; z = y/d — относительное смещение подвижного электрода; *y* — смещение подвижного электрода. Расчеты [5—7] показывают, что максимальная погрешность при этом не превысит 5 %.

Результаты расчетов и их анализ

На рис. 3 и 4 представлены зависимости напряжений на конденсаторах и токов диодов от времени, рассчитанные с использованием формул (1)—(3).



Рис. 3. Зависимости напряжений на конденсаторах C_1 (1) и C_2 (2) и разности этих напряжений (3) от нормированного значения времени. Кривая 4 — изменение емкости первого конденсатора



Рис. 4. Зависимости токов диодов и тока подзаряда от нормированного значения времени:

I — ток подзаряда; 2 — ток диода D_2 ; 3 — ток диода D_3 ; 4 — ток диода D_1 . Кривая 5 — изменение емкости первого конденсатора

В расчетах полагали, что изменение межэлектродного зазора *d* происходит по гармоническому закону с частотой *f*. Остальные параметры генератора, используемые в расчетах, приведены в таблице.

На обоих рисунках интервал времени, соответствующий уменьшению емкости первого конденсатора от максимального значения до минимального, относится к первому этапу работы генератора, а интервал времени, соответствующий изменению емкости первого конденсатора от минимального значения до максимального, относится ко второму этапу.

Видно (см. рис. 3), что практически на протяжении всего периода напряжения на конденсаторах превышают напряжение источника питания, а их разность изменяется от нуля до V_0 .

Характерной особенностью зависимости рис. 4 является наличие тока диода D_2 и фазы разряда у тока источника питания. Отметим, что в установившемся режиме эти броски токов появляются только при учете обратных токов диодов. Именно эти особенности и не были учтены в работе [4]. В то же время, по нашим оценкам, в зависимости от напряжения источника питания ток разряда источника может составлять от 9 % до более чем 100 % тока подзаряда (в последнем случае источник будет разряжаться).

Для проверки адекватности используемой модели были проведены экспериментальные иссле-

Параметр	Обозна- чение	Значение
Напряжение питания Частота колебаний Начальная емкость конденсаторов Максимальная емкость конденсаторов Коэффициент модуляции емкости Обратный ток насыщения диода Коэффициент неидеальности диода		62 39 22 110 9 3 1,82



Рис. 5. Зависимости напряжения на диоде D_1 от времени: 1 -эксперимент; 2 -расчет

дования характеристик макета генератора, параметры которого приведены в таблице.

На рис. 5 представлены зависимости напряжения на диоде D_1 от времени, полученные экспериментально и в результате моделирования. На рисунке видно, что экспериментальные и теоретические зависимости хорошо совпадают, следовательно, выражения (1)—(3) достаточно хорошо описывают работу генератора и их можно использовать для анализа схемы.

В работе [4] были получены аналитические выражения, позволяющие оценить заряд, получаемый основным источником за один цикл работы генератора. При этом не учитывались обратные токи диодов, а для улучшения согласия результатов моделирования и эксперимента авторам пришлось предположить, что при токе около десятка наноамперов падение напряжения на диоде составляет порядка 0,5 В, что вызывает большие сомнения.

На наш взгляд, существенное расхождение с экспериментом в первую очередь обусловлено пренебрежением обратными токами диодов, особенно в случаях, когда ток подзаряда сравним с обратными токами диодов.

Анализ показал, что при учете обратных токов диодов выражение для заряда, получаемого основным источником за один цикл работы генератора, может быть представлено в виде

$$Q = V_0 C_{\max} \Psi_1 - I_S \Psi_2 / f,$$
 (4)

где

$$\Psi_1 = \frac{\eta - 1/\eta - 1}{\eta + 1}; \ \Psi_2 = \frac{1.5\eta + 1}{\eta + 1}.$$

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 11, 2012 -

Сопоставление показало, что данное выражение значительно лучше описывает экспериментальные результаты, чем соответствующее выражение, приведенное в работе [4].

На практике коэффициент модуляции емкости $3 < \eta \le 10$. При этом $0,42 < \Psi_1 < 0,81$ и $1,37 < \Psi_2 < 1,46$, т. е. с увеличением коэффициента модуляции емкости роль обратных токов диодов несколько уменьшается. Уменьшение вклада обратных токов диодов в результирующий ток подзаряда будет и при увеличении частоты модуляции емкости *f*.

Как показал анализ, основной разряд источника питания происходит через запертый диод D_2 . Если же через несколько циклов после начала работы схемы отключать диод D_2 , то можно существенно увеличить результирующий ток подзаряда источника. Например, если принять, что напряжение источника питания равно 4 В, а остальные параметры соответствуют приведенным в таблице, то при отключении D_2 ток подзаряда возрастет в 2,2 раза. Следует, однако, заметить, что при отсутствии диода D_2 из-за неконтролируемых утечек общий заряд конденсаторов будет уменьшаться, что может привести к прекращению работы генератора.

Отметим, что максимально возможный ток подзаряда данного генератора I_{\max} не превосходит величины $V_0 C_{\max} f$.

Оценка критических значений основных характеристик компонентов генератора

В рамках используемой модели можно оценить и критические значения основных параметров генератора. Так, согласно (4) МЭМ генератор на основе дупликатора Беннета сможет осуществлять подзаряд источника питания только при следующих условиях:

- коэффициент модуляции емкости не менее 1,62;
- частота внешних колебаний больше

$$f_{\min} = 2q_0 \frac{\eta - 1/\eta - 1}{I_s(3\eta + 2)};$$

• токи насыщения используемых диодов не превышают

$$I_{S, \max} = 2\mu \frac{\eta^2 - \eta - 1}{\eta(3\eta + 2)};$$

• напряжение источника питания не менее

$$V_{0,\min} = I_S \frac{1.5\eta^2 + \eta}{C_{\max} f(\eta^2 - \eta - 1)},$$

где $q_0 = C_{\max} V_0$, а $\mu = q_0 f$.

Заключение

Проведен анализ работы микроэлектромеханического генератора на основе дупликатора Беннета. Показано, что при анализе необходимо учитывать обратные токи диодов.

Получено аналитическое выражение, позволяющее оценить средний ток подзаряда источника с учетом обратных токов диодов.

Установлено, что отключением диода D_2 через некоторое время после начала работы генератора можно существенно увеличить результирующий ток подзаряда источника питания.

Оценены критические значения основных характеристик компонентов генератора, при которых он будет работать в режиме подзаряда.

Список литературы

1. Драгунов В. П., Остертак Д. И. Архитектура и анализ схем МЭМ рекуператоров электрической энергии // Нанои микросистемная техника. 2011. № 4. С. 49—54.

2. **Dragunov V. P., Ostertak D. I.** Microelectromechanical Converters // Russian Microelectronics. 2012. V. 41. N 2. P. 107–121.

3. Драгунов В. П., Доржиев В. Ю. МЭМ рекуператоры без разрыва цепи, содержащей индуктивный элемент // До-клады АН ВШ РФ. 2011. № 2. С. 92—101.

4. **de Queiroz A. C. M., Domingues M.** The doubler of electricity used as battery charger // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2011. V. 58. N 12. P. 797–801.

5. Драгунов В. П., Остертак Д. И. Анализ электромеханических процессов в МЭМП с изменяющейся площадью перекрытия электродов // Научный вестник НГТУ. 2009. № 2. С. 115—128.

6. Драгунов В. П., Остертак Д. И. Расчет латеральной составляющей электростатической силы в МЭМС // Научный вестник НГТУ. 2009. № 1. С. 229—233.

7. Драгунов В. П., Остертак Д. И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Часть І. Расчет емкостей // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 7. С. 37—41.

УДК 531.383

В. Я. Распопов¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Ю. В. Иванов¹, д-р техн. наук, проф., П. П. Парамонов², д-р техн. наук, ген. директор, Ю. И. Сабо², д-р техн. наук, гл. конструктор направления, В. В. Матвеев¹, канд. техн. наук, доц., А. П. Шведов¹, канд. техн. наук, доц.,

¹ФГБОУ ВПО "Тульский государственный университет", ²ФГУП Санкт-Петербургское ОКБ

"Электроавтоматика" им. П. А. Ефимова, e-mail: tgupu@yandex.ru

РЕЗЕРВНАЯ БЕСПЛАТФОРМЕННАЯ СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ БАЗЕ

Поступила в редакцию 27.06.2012

Рассматривается резервная бесплатформенная система ориентации, построенная на отечественной элементной базе: микромеханических гироскопах ММГ-ЭПТРОН (ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор") и компенсационных акселерометрах АТ1104 (ОАО АНПП "Темп-Авиа"). Предлагается конструкция измерительного модуля резервной системы ориентации, который может применяться на беспилотных летательных аппаратах и как дублирующая система для пилотируемых летательных аппаратов.

Ключевые слова: гировертикаль, микромеханические чувствительные элементы, вариации Аллана

Введение

Одним из способов повышения надежности навигационного оборудования является резервирование, при котором осуществляется дублирование однотипных навигационных систем. Развитие отечественной микромеханической элементной базы открывает перспективу создания недорогих, малогабаритных навигационных систем, которые могут использоваться как резервные устройства при выходе из строя основного навигационного оборудования.

Описание конструкции

Резервная бесплатформенная система ориентации (РБСО) спроектирована в рамках совместных работ ТулГУ с ОКБ "Электроавтоматика" (рис. 1, см. третью сторону обложки). Структурно система включает в себя три микромеханических гироскопа ММГ-ЭПТРОН (ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"), три микромеханических гироскопа *ADXRS*-642 (компания *Analog Devices*) и три компенПараметры питания измерительного модуля РБСО

Таблица 1

Параметр	Значение
Потребляемый ток по уровню напряжения +15 В и –15 В	0,1 A
Потребляемый ток по уровню напряжения +9 В	0,5 A
Амплитуда шумового сигнала по уровню напря- жения +15 В и -15 В	э мв
Амплитуда шумового сигнала по уровню напряжения +9 В	10 мВ

сационных акселерометра АТ1104 (ОАО АНПП "Темп-Авиа"), вычислительное устройство на базе микроконтроллера *ADUC* 7026 (компания *Analog Devices*), обеспечивающее выработку углов тангажа, крена, угловых скоростей, схемы согласования измерительных элементов с вычислительным устройством, последовательный цифровой интерфейс, по которому осуществляются вывод параметров ориентации и настройка режимов работы системы.

Отечественные гироскопы дублируются иностранными приборами в целях их сравнительной оценки.

Конструктивно система состоит из цельного алюминиевого корпуса, в котором размещены три взаимоортогональные платы с микромеханическими гироскопами, а также основной платы, в задачу которой входят обработка сигналов с датчиков и выработка угловых параметров объекта. Акселерометры размещены ортогонально и крепятся непосредственно к корпусу модуля.

Масса измерительного модуля РБСО составляет 750 г. Габаритные размеры модуля $\emptyset 118 \times 80$ мм. Питание модуля осуществляется тремя уровнями напряжений относительно общего провода +15 В, -15 В, +9 В. Параметры питания приведены в табл. 1.

Внешний последовательный цифровой интерфейс совместим со стандартным интерфейсом RS-232, с частотой передачи данных 1,25 Мбит/с.

Анализ погрешностей модуля

В работе проведен анализ случайных погрешностей датчиков измерительного модуля. На рис. 2 (см. третью сторону обложки) приведены графики отклонений Аллана триады микромеханических гироскопов *ADXRS*-642) и ММГ-ЭПТРОН.

Прямолинейные участки кривых отклонений Аллана говорят о наличии случайной погрешности типа белого шума, которая, как известно, характеризуется случайным блужданием угла (*angle random walk, ARW*) с размерностью $^{\circ}/^{4^{1/2}}$. Область минимума кривых Аллана характеризуют случайные вариации нулевого сигнала (нестабильность нуля).

Значения случайных погрешностей микромеханических гироскопов, полученные из анализа кривых отклонения Аллана, приведены в табл. 2, 3.

		Т	аблица 2
Значения погрешностей	гироскопов	ММГ-2	

Датчик	Случайное блуждание угла <i>ARW</i> , °/ч ^{1/2}	Нестабильность нуля, °/ч
1	13,44	2,17
2	11,28	2,55
3	15,92	4,21

Таблица 3

Значения	погрешностей	гироскопов	ADXRS-642
Una iumn	norpemnoeren	Inpochonop	

Датчик	Случайное блуждание угла <i>ARW</i> , °/ч ^{1/2}	Нестабильность нуля, °/ч
1	63,38	17,10
2	81,09	19,08
3	72,92	14,00

Таблица 4

Характеристики погрешностей акселерометров

Датчик	Случайное блуждание скорости VRW, м/с ^{3/2}	Нестабильность нуля, м/с ²
1	0,004347	0,001348
2	0,004036	0,001008
3	0,003914	0,001258

Из сравнения данных таблиц 1 и 2 можно сделать вывод, что гироскопы ММГ-ЭПТРОН имеют лучшие характеристики, по сравнению с гироскопами *ADXRS*-642, что способствует более высокой точности выработки параметров ориентации.

На рис. 3 (см. четвертую сторону обложки) приведены графики выходных сигналов гироскопов ММГ-ЭПТРОН и *ADXRS*-642 с параллельными измерительными осями при угловом движении основания.

Анализ графиков показывает, что выходной сигнал гироскопа ММГ-ЭПТРОН имеет постоянное запаздывание порядка 250 мс по отношению к выходному сигналу *ADXRS*-642. Данная задержка не критична при использовании системы на пилотируемых самолетах или беспилотных летательных аппаратах самолетного и вертолетного типа. Однако эта задержка ограничивает применение датчиков ММГ-ЭПТРОН на высокоманевренных вращающихся по крену летательных аппаратах.

Также в рамках исследования погрешностей первичных измерителей измерительного модуля РБСО был проведен анализ случайных погрешностей трех акселерометров АТ1104 с применением вариаций Аллана (рис. 4, см. четвертую сторону обложки и табл. 4).

Из результатов исследования выявлено, что шумовые погрешности акселерометров характеризуются случайным блужданием скорости (*velocity random walk, VRW*), что составляет для данных акселерометров $0,003...0,004 \text{ м/с}^{3/2}$ (табл. 4). Также в процессе калибровки датчиков AT1104 были определены погрешности смещения нулевых сигналов триады акселерометра, которые учитываются в алгоритме работы РБСО. Смещения нулевых сигналов составили не более 0,01 g. При этом нестабильность нуля акселерометров, определенная с применением вариаций Аллана, составляет порядка 0,001 м/с². Данная точность вполне приемлема для использования в резервных системах.

Принцип работы резервной бесплатформенной системы ориентации

РБСО вырабатывает углы тангажа и крена по информации, поступающей с микромеханических акселерометров и гироскопов, оси чувствительности которых ориентированы по осям связанной системы координат.

Принцип работы системы основан на постоянной корректировке по сигналам акселерометров системы ориентации, вырабатывающей угловую ориентацию по информации, поступающей с микромеханических гироскопов [1].

Для проведения коррекции системы в качестве связующего элемента каналов микромеханических гироскопов и акселерометров применяется фильтр Калмана, включенный по неинвариантной схеме комплексирования (рис. 5) [2].

На рис. 5 Ω_x , Ω_y , Ω_z — проекции угловой скорости движения летательного аппарата на оси связанной системы координат [3]; g_x , g_y , g_z — проекция ускорения свободного падения на оси связанной системы координат; n_x , n_y , n_z — проекция кажущегося ускорения летательного аппарата на оси связанной системы координат.

В системе фильтр Калмана решает следующую задачу: подавляет в векторе кажущегося ускорения *n* составляющую *a*, описывающую ускоренное движение летательного аппарата, сохраняя при этом вектор ускорения свободного падения *g*. Таким образом, на выходе фильтра Калмана формируются проекции вектора *g*, по которым на основе известных зависимостей вычисляются углы тангажа и крена летательного аппарата [4].

Предлагаемая система является автономной и обеспечивает выработку углов тангажа и крена без привлечения дополнительной информации о параметрах и режимах движения летательного аппарата. При наличии линейного ускорения в показаниях РБСО появляется погрешность, связанная с разницей между линиями местной вертикали и кажущейся вертикали, линия которой направлена вдоль суммарного вектора ускорения свободного падения и линейного ускорения объекта. То есть в этом случае показания РБСО будут стремиться с некоторой постоянной времени *T* (порядка 30...100 с) к показаниям акселерометров, которые при наличии линейного ускорения объекта фиксируют углы отклонения от линии кажущейся вертикали. Например,



Рис. 5. Функциональная схема РБСО

при воздействии постоянного линейного ускорения 0,1g, вектор которого лежит в горизонтальной погрешности РБСО, за период времени 90...300 с приблизится по апериодическому закону к значению 5...6°.

Достоинством данной схемы является то, что параметры связующего звена определяются только используемой измерительной элементной базой (датчики угловой скорости и акселерометры) и параметрами применяемого вычислительного устройства, определяющего шаг дискретизации РБСО. При переменных ускорениях и наличии углового движения летательного аппарата их влияние на точность РБСО будет ослабляться.

Помимо систематической составляющей в показаниях РБСО имеется случайная составляющая погрешности в виде шумового сигнала, значение которой по результатам математического анализа можно ожидать в диапазоне 0,01...0,1°.

Заключение

Показана возможность построения резервных систем ориентации на отечественной элементной

базе, предложена конкретная техническая реализация такой системы и проведен анализ ее техничес-ких характеристик.

Список литературы

1. Распопов В. Я. Комплексированные микросистемы ориентации малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / В. Я. Распопов, Ю. В. Иванов, Р. В. Алалуев, В. В. Матвеев, М. Г. Погорелов, А. В. Ладонкин, А. П. Шведов, П. П. Парамонов, А. В. Шукалов, Ю. И. Сабо // XVIII Санкт-Петербургская конференция интегрированных навигационных систем. СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2011. С. 161—169.

2. Патент на полезную модель 96235 РФ. Бесплатформенная инерциальная гировертикаль / А. П. Шведов, Ю. В. Иванов, В. Я. Распопов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО "Тульский государственный университет", заявл. 04.03.2010, опубл. 20.07.2010.

3. ГОСТ 20058—80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения.

4. **Гироскопические** приборы и системы: учеб. для вузов по спец. "Гироскоп, приборы и устройства" / Д. С. Пельпор, И. А. Михалев, В. А. Бауман и др. / Под. ред. Д. С. Пельпора. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1988. 424 с.

Системы на кристалле

УДК 621.396.677.3

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., директор,
О. С. Матвеенко, канд. техн. наук, науч. сотр.,
Д. Л. Гнатюк, мл. науч. сотр.,
А. П. Лисицкий, канд. техн. наук, нач. ОПОРИД,
Ю. В. Федоров, зав. лаб.,
Д. В. Крапухин, инж.-исследователь,
С. Л. Бунегина, пом. директора,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН),
e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru

МНОГОСЛОЙНЫЕ ПЛАНАРНЫЕ АНТЕННЫ. ЧАСТЬ 2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ МНОГОЧАСТОТНОГО РЕЖИМА КРУГОВОЙ ИЛИ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Поступила в редакцию 19.05.2012

Рассмотрены методы построения антенн с двумя рабочими диапазонами частот, основанных на многослойных планарных излучателях, и методы обеспечения круговой или эллиптической поляризации излучения многослойных планарных антенн.

Ключевые слова: многослойная антенна, многослойная печатная антенна, антенна с апертурной связью, антенная решетка, двухчастотное излучение, излучение антенны круговой, эллиптической поляризации

Введение

Многослойные антенные элементы открывают возможности использования площади раскрыва ФАР для излучения в нескольких диапазонах при двойной (круговой или эллиптической) поляризации (концепция *dual-band and dual-polarized* (DBDP)) благодаря естественной развязке возбудителей, расположенных в различных слоях.

Обеспечение многочастотного режима

В обзорной работе [1] приведены антенны в полосах L/C, L/X, S/X, Ka/Ku, реализованные путем совмещения в одном антенном элементе автономных (электрически не связанных) АСА различных диапазонов. Максимальная полоса достигнута для реализаций антенны *S*- и *X*-полос — для *S*: \geq 8,9 % и для *X*: \geq 17 %, а также для *S*: \geq 11,4 % и для *X*: \geq 13,9 %. Характерным примером двухчастотной ФАР является антенна (рис. 1), описанная также в работе [2]. Для обеспечения круговой поляризации на каждый излучатель *X*- и *S*-диапазонов подаются сдвинутые по фазе *V*- и *H*-сигналы для *S*-диапазона (линии *1*, *2*), для *X*-диапазона (линии *3*, *4*). Получена рабочая полоса в *X*-диапазоне — 1 %, в *S*-диапазоне — 1,03 %.



Рис. 1. Двухдиапазонная антенна с излучателями X- и S-диапазонов в отдельных слоях. Черным обозначены проводники излучателей в S-диапазоне (контуры с разрывом)

1, 2 — линии подачи сигналов V- и H-поляризации на излучатель S-диапазона; 3, 4 — линии подачи сигналов V- и H-поляризации на излучатель X-диапазона



том показаны щели



Рис. 3. Топология ПИ с ортогональными подводящими линиями для создания круговой поляризации



Рис. 4. Вид излучателя *L*-диапазона с размещенными в окнах излучателями *C*-диапазона (показаны схематично)



В работе [3] описана ACA (вида рис. 2) с отдельными ПИ и подводящими линиями для двух узких диапазонов с центральными частотами 14 и 35 ГГЦ. Данные ПИ и подводящие линии расположены в различных четырех слоях. Для каждого диапазона от соответствующей подводящей линии возбуждается пара ПИ. размерный шаг ПИ диапазона 14 ГГц составляет 12 мм.

В двухдиапазонных антеннах для создания требуемой круговой поляризации излучения на ПИ следует подавать пару сдвинутых по фазе копий излучаемого сигнала (сигналы *V*- и *H*-поляризации). Как и для антенн с двухслойной металлизацией, возможно непосредственное соединение ПИ и подводящих линий (рис. 3) [4].

В работе [5] реализован совместный излучатель *L* и *C* диапазонов с тремя слоями металлизации: общим слоем подводящих микрополосков обоих диапазонов; земляным слоем со щелями; слоем ПИ с антенным элементом (рис. 4, 5). Четыре излучателя *C*-диапазона расположены в окнах ПИ *L*-диапазона, каждый ПИ запитывается через отдельную пару ортогональных щелей, что обеспечивает круговую поляризацию.

Существенно большие значения рабочей полосы частот продемонстрировала ячейка ФАР с непосредственной подачей сигналов на ПИ [6]: 9,5 % для *S*-диапазона; 25 % для *X*-диапазона. Ячейка ФАР показана на рис. 6. Излучатель *S*-полосы выполнен как решетка, в окнах которой излучают квадратные ПИ *X*-диапазона.





1, 2 — подводящие линии для V- и H-поляризации S-диапазона; 3, 4 — подводящие линии для V- и H-поляризации X-диапазона; 5, 6 — ПИ X-диапазона; 7, 8 — ПИ S-диапазона

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 11, 2012 –

Многослойные антенны позволяют решать задачи совместного излучения сигналов в близких полосах частот одним ПИ при изоляции источников сигналов. Эта концепция защищена патентом [7] (рис. 7). В патенте описана ACA с двумя пассивными ПИ (1, 2), в которой возможны прием и передача в несовпадающих диапазонах с полосами частот 10 % в окрестности 12,25 и 14,25 ГГц, сигналы данных полос подаются на нижний ПИ (3) непосредственно двумя ортогональными подводящими линиями (4, 5). КУДН достигает 19 дБ в обоих диапазонах.



Рис. 7. АСА с подачей сигналов двух диапазонов ортогональными подводящими линиями:

1, 2 — пассивные ПИ; 3 — активный ПИ; 4, 5 — подводящие линии для двух диапазонов; 6 — земляной слой









Рис. 10. Топология и сечение двухдиапазонной антенны с фильтрами в подводящих линиях:

I — ПИ; 2, 3 — микрополосковые линии; 4, 5 — полосовые фильтры

Трехслойная антенна для двух диапазонов с подводом сигналов в оптимальные точки нижнего ПИ представлена в работе [8] (рис. 8). Для близких полос 7,25...7,75; 7,9...8,4 ГГц достигнута развязка источников сигналов более 17 дБ подводом сигналов через частотно-селективный делитель, показанный на рис. 9.

Аналогичная задача совместного излучения близких по частоте сигналов с центральными частотами 2,1 и 2,45 ГГц с полосами 3,8 % решена подачей обоих сигналов на один ПИ (*1*) двумя микрополосковыми линиями 2, 3 с полосовыми фильтрами 4, 5 (рис. 10) [9]. Достигнута развязка не хуже —40 дБ.



Рис. 11. Вид АСА, обеспечивающей прием и передачу на одной частоте

При развязке подводящих линий более 15 дБ возможны прием и передача на одной частоте ортогонально поляризованными сигналами в ACA вида рис. 11 [10].

Обеспечение круговой или эллиптической поляризации излучения

АСА вида рис. 12, описанная в части 1 данной работы [11], имеет малую кросс-поляризацию (*crosspolarization*). Вместе с тем для ряда применений необходимо обеспечивать круговую или эллиптическую поляризацию излучения. Разработаны различные варианты антенн, обеспечивающих круговую поляризацию на основе подачи на излучающий элемент сдвинутых по фазе излучаемых сигналов.

Структура АСА позволяет использовать один ПИ при ортогональных щелях, возбуждаемых отдельными микрополосковыми линиями (рис. 13), что затруднительно для антенн с двумя слоями металлизации [12].

Требуемая поляризация может быть достигнута использованием крестообразной щели и круглого ПИ (рис. 14) [13]. Полоса отдельной антенны составляет 9,3 %.

В работе [14] описана ACA с ортогональными возбуждающими микрополосками через крестообразную щель (рис. 15).

Разработана антенна с крестообразной апертурой, ПИ в двух слоях и парой ортогональных воз-





Рис. 13. Структура АСА с двумя щелями



Рис. 14. Антенна эллиптической поляризации с крестообразной щелью

будителей (рис. 16). В работе [15] описана реализация данной АСА с рабочей полосой частот 35,5 % (8,1...11,6 ГГц). В работе [16] для этой АСА достигнута полоса 42 % в *X*-диапазоне. Разница относительной полосы для данных близких структур указывает на важность тщательной оптимизации топологии и параметров слоев антенны.

Подобная схема возбуждения применена в ACA (рис. 17) *L*-, *S*-диапазонов [17]. В ней одна возбуждающая линия (*I*) размещена выше щели *2*, другая линия (*3*) ниже щели *2*, введен нижний экран — проводник крестообразной формы *4*, что увеличивает рабочий диапазон до 50 % (1,5...2,5 ГГц).

Излучатель, возбуждаемый соосными копланарными подводящими линиями с щелями сложной формы (рис. 18), обеспечивает полосу частот 1,7...2,2 ГГц (25 %) (оценка по уровню отражения S11 < -15 дБ). Развязка между подводящими линиями, расположенными на одной оси, не превышает -25 дБ [18].

Реализация АСА размером 19,5 × 19,5 мм с круговой поляризацией с четырьмя слоями диэлектрика, одним ПИ, двумя ортогональными щелями и двумя

подводящими линиями описана в работе [19], полоса частот — 8 % от центральной частоты 10,3 ГГц.

Оптимизация топологии ACA с пассивным ПИ и расположенным под ним активным ПИ, питаемым парой подводящих линий через Н-образные ортогональные щели, совместно с оптимизацией формирователя сдвинутых по фазе питающих сигналов позволила достичь полосы 47,0 % (1,61...2,54 ГГц) [20].

Для создания ортогональных излучающих токов на ПИ использована подача сигналов двумя путя-



Рис. 15. Антенна с ПИ 1 и ортогональными возбуждающими микрополосками 2 через крестообразную щель 3



Рис. 16. Антенна с крестообразной щелью, возбуждаемая ортогональными линиями:

1, 2 – ПИ; 3 – крестообразная щель; 4, 5 – подводящие линии



Рис. 17. Антенна с крестообразным экраном-проводником под щелью:

1 — верхняя возбуждающая линия; 2 — крестообразная щель; 3 — нижняя возбуждающая линия; 4 — нижний экран крестообразной формы; 5, 6 — ПИ



Рис. 18. АСА эллиптической поляризации с соосными щелями. Серый цвет обозначает проводники подводящих копланарных линий

ми: непосредственно от питающей линии в слое ПИ и через щель (рис. 19) в *L*-диапазоне [21].

Полностью симметричной относительно направления излучения и, следовательно, обеспечивающей круговую поляризацию, является антенна с широкой полосой 7,5...17 ГГц (рис. 20) [22].

Возможность подачи в АСА двух сигналов при достаточно высокой развязке позволяет запитывать антенну противофазными сигналами с выхода двухтактного выходного каскада усилителя мощности. В антенне (рис. 21) с электродинамической связью микрополосков и ПИ над ними [23] два микрополоска 1 и 2 применены для подачи к ПИ 3 противофазных сигналов двухтактного усилительного каскада.

Для *V*-диапазона предложена антенна с возбуждением щели подачей противофазных сигналов в точках *1* и *2* (рис. 22) с полосой частот 55...65 ГГц [24].



Рис. 19. АСА с дополнительной подачей сигнала на ПИ: a — слой ПИ с питающей линией; δ — земляной слой со щелями; в — нижний слой для подачи сигнала на ПИ через щель



Рис. 20. АСА с круговой поляризацией



Рис. 21. Антенна с подачей противофазных сигналов двухтактного усилителя:

1, 2 — подводящие полоски с противофазными сигналами; 3 — ПИ; 4 — земляной проводник



Рис. 22. Антенна с возбуждением щели противофазными сигналами: a — сечение антенны; δ — точки подачи противофазных сигналов 1, 2

Заключение

Совокупность малых размеров достижима для многослойных типов антенн и прежде всего апертурно-связанных антенн (ACA), которые обеспечивают существенное повышение характеристик и в первую очередь, широкополосности. АСА позволяют получить ширину рабочей полосы, близкую к 100 % при высокой направленности, что важно для реализации компактных фазированных решеток. Близкие по строению антенны демонстрируют различную широкополосность, что указывает на важность тщательного подбора и оптимизации параметров и размеров элементов антенны. Реализация апертурно-связанных антенн с двумя рабочими диапазонами частот, с круговой или эллиптической поляризацией не сопровождается увеличением их размеров.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 16.426.11.0031 от "31" мая 2011 г. по заказу Минобрнауки России.

Список литературы

1. **Shun-Shi Zhong.** DBDP SAR Microstrip Array Technology // Microstrip Antennas / Edited by Nasimuddin Nasimuddin. 2011.

2. Shih-Hsun Hsu, Yu-Jiun Ren, Kai Chang. A Dual-Polarized Planar-Array Antenna for S-Band and X-Band Airborne Applications // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2009. V. 51, P. 70–78.

3. Bairavasubramanian R., Thompson D., DeJean G., Ponchak G. E., Tentzeris M. M., Papapolymerou J. Recent Developments on Lightweight, Flexible, Dual Polarization/Frequency Phased Arrays using RF MEMS Switches on LCP Multilayer Substrates for Remote Sensing of Precipatation // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2005. V. 18. P. 393–396.

4. Korkontzila E. G., Papafilippou D. B., Chrissoulidis D. P. Miniaturization of microstrip patch antenna for wireless applications by use of multilayered electromagnetic band gap substrate // First European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP. 2006. P. 1–6.

5. Vetharatnam G., Kuan C. B., Teik C. H. Compact dual band antenna for space borne sar // International Symposium on Antennas and Propagation, Proceedings of ISAP. 2007. P. 238–241.

6. Minseok Han, Juman Kim, Daesung Park, Hyoungjoo Kim, Jaehoon Choi. Dual Polarized Array Antenna for S/X Band Ac-

tive Phased Array Radar Application // Journal of the Korean institute of electromagnetic engineering and science. 2010. V. 10, N 4. P. 309-315.

7. **Патент USA.** Microstrip patch antenna having high gain and wideband / H. S. Ro, J. S. Yun, S. I. Jeon, C. J. Kim / 09.10.2003.

8. García-Aguilar A., Inclán-Alonso J. M., Vigil-Herrero L., Fernández-González J. M., Sanmartín-Jara J., Sierra-Pérez M. Dualpolarized planar antenna for satellite communications at X-band // Antennas and Propagation Conference (LAPC), Loughborough. 2010. P. 429–432.

9. Inclan-Sanchez L., Vazquez-Roy J.-L., Rajo-Iglesias E. High Isolation Proximity Coupled Multilayer Patch Antenna for Dual-Frequency Operation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2008. V. 56. P. 1180–1183.

10. **Cabria L., Garcia J. A., Gutierrez-Ríos J., Tazon A., Vassall J.** Active Reflectors: Possible Solutions Based on Reflectarrays and Fresnel Reflectors. Application Article // International Journal of Antennas and Propagation, Hindawi Publishing Corporation. 2009. P. 1–10.

11. Мальцев П. П., Матвеенко О. С., Гнатюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В., Крапухин Д. В., Бунегина С. Л. Многослойные планарные антенны. Часть 1. Типы, реализации, преимущества // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 10. С. 45—54.

12. Carrasco E., Encinar J. A., Barba M., Vincenti R., Sorrentino R. Dual-polarization reflectarray elements for Ku-band Tx/Rx portable terminal antenna // Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2010. P. 1–5.

13. Yi Wang, Lei Wang, Yunqing Sun. Design of L-circularly polarized microstrip antenna array at Ka band // International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). 2010. P. 15–17.

14. Kai Fong Lee, Hai Fong Lee, Jenny Lee. Advances in Microstrip and Printed Antennas. Wiley-Interscience, 1997.

15. Jung-Kyu Lee, Chi-Hyung Ahn, Kai Chang. Broadband circularly polarized aperture-coupled microstrip antenna with dualoffset feedlines // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI). 2011. P. 1127–1130. 16. Kim D. G., Smith C. B., Chi-Hyung Ahn, Kai Chang. A du-

16. **Kim D. G., Smith C. B., Chi-Hyung Ahn, Kai Chang.** A dual-polarization aperture coupled stacked microstrip patch antenna for wideband application // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). 2010. P. 1–4.

17. **Ghorbani K., Waterhouse R. B.** Dual polarized wide-band aperture stacked patch antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2004. V. 52. P. 2171–2175.

18. Senglee Foo. A dual polarized CPW-Fed aperture-coupled stacked patch // Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting: Proc. of 13th International Symposium on ANTEM/URSI 2009. P. 1–4.

19. Albooyeh M., Komjani N. A Reflectarray Antenna for Circular Polarization // Proc. of the 39th European Microwave Conference. 2009. P. 22–24. 20. Zhao F., Liu T. T., Qian Z. P. A circularly polarized aperture

20. **Zhao F., Liu T. T., Qian Z. P.** A circularly polarized aperture stacked patch microstrip antenna for L band// Progress in Electromagnetics Research C. 2011. V. 20. P. 95–109.

21. **Huang J.** The development of inflatable array antennas // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2001. V. 43. P. 44–50.

22. Huss H.-G., Gunnarsson R., Andersson P., Erickson R. A wideband, wide angle scan, microstrip array antenna element // European Radar Conference, EURAD. 2005. P. 275–278.

23. Ee Lee, Chan K. M., Gardner P., Dodgson T. E. Active Integrated Antenna Design Using a Contact-Less, Proximity Coupled, Differentially Fed Technique // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2007. V. 55. P. 267–276.

24. Yang B., Yarovoy A., Amaldoss S. E. Performance analysis of a novel LTCC UWB 60 GHz semi-shielded aperture stacked patch antenna with differential feeding // Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). 2011. P. 1882–1885.

УДК 621.315.592

А. П. Сеничкин, канд. техн. наук, зам. директора, **А. С. Бугаев,** зав. лаб.,

А. Э. Ячменев, мл. науч. сотр.,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, г. Москва, e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ НАНОНИТЕЙ ИЗ АТОМОВ ОЛОВА, ВСТРОЕННЫХ В КРИСТАЛЛ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Поступила в редакцию 25.07.2012

Обнаружены особенности вольт-амперных характеристик, измеряемых в направлениях вдоль и поперек системы нанонитей атомов олова, расположенных в одной плоскости, встроенной в кристалл GaAs: при измерениях тока вдоль нанонитей в сильных электрических полях обнаружен перегиб электрического тока перед его насыщением; при измерениях тока поперек нанонитей в сильных электрических полях после насыщения тока возникает его нестабильность.

Ключевые слова: наноструктуры, квантовые проволоки, квантовые нити, молекулярно-лучевая эпитаксия

В работе [1] сообщалось о получении методом молекулярно-лучевой эпитаксии образцов, представляющих собой систему нанонитей, состоящих из атомов олова, встроенных в кристалл арсенида галлия (GaAs). Для получения нанонитей использовали вицинальные подложки GaAs, плоскость которых была отклонена от точной ориентации (100) на угол $0,3 \pm 0,1^{\circ}$ в направлении [011]. После выращивания на такой подложке 0,5...1 мкм арсенида галлия поверхность кристалла представляет собой совокупность террас, имеющих высоту в один монослой (0,28 нм) со средним расстоянием между краями террас около 50 нм, ориентированных преимущественно в направлении [011]. Дельталегируя такую поверхность атомами олова, можно добиться того, что значительная часть высаженных атомов олова будет располагаться на краях атомных террас [2], образуя атомные цепочки. Заращивая образовавшиеся цепочки в специально подобранных режимах, которые сохраняют неоднородное распределение атомов олова в дельта-слое, можно получить систему нанонитей, состоящих из атомов олова, встроенных в кристалл арсенида галлия [1]. При уровне дельта-легирования атомами олова $(1...8) \cdot 10^{12}$ см⁻² среднее расстояние между атомами олова в нанонити в предположении, что все высаженные атомы олова декорировали края террас,

составляет 2...0,2 нм, т. е. существенно меньше, чем боровский радиус мелкой донорной примеси в арсениде галлия (10 нм). Это означает сильное перекрытие волновых функций электронов для основных состояний мелкой донорной примеси соседних атомов олова. Среднее расстояние между нанонитями равно среднему расстоянию между краями террас, которые декорировало олово при дельта-легировании, и составляет около 50 нм, что существенно больше значения боровского радиуса.

Образование нанонитей, состоящих из атомов олова, непременно должно приводить к анизотропии протекания тока и электропроводности образцов, измеряемой вдоль и поперек системы нанонитей, т. е. во взаимно ортогональных кристаллографически эквивалентных направлениях [011] и [011] соответственно. Поэтому о сохранении латерального неоднородного распределения атомов олова в плоскости исходного дельта-слоя после заращивания (т. е. об образовании нанонитей из атомов олова, встроенных в кристалл арсенида галлия) судили по наличию анизотропии вольт-амперных характеристик (ВАХ) образцов при протекании тока вдоль и поперек нанонитей. Топология измеряемых образцов и условия формирования омических контактов описаны в работе [1]. При определенных условиях заращивания атомных цепочек олова, образовавшихся при декорировании краев атомных террас при дельта-легировании, были получены образцы, обнаруживавшие заметную анизотропию вольт-амперных характеристик, о которых и сообщалось в работе [1].

Более детальные исследования указанных вольт-амперных характеристик образцов, дельталегированных оловом до концентрации $(6...8) \cdot 10^{12}$ см⁻² позволили установить особенности при протекании тока вдоль и поперек нанони-







Рис. 2. Типичная ВАХ образцов при протекании тока вдоль нанонитей



Рис. 3. Типичный участок ВАХ образцов в области сильных электрических полей при протекании тока поперек нанонитей

тей, указанные стрелками на рис. 1. (На этом и последующих рисунках: W — ширина омических контактов; L — расстояние между омическими контактами, значки \parallel и \perp соответствуют протеканию тока вдоль и поперек нанонитей). Контактное сопротивление образцов было порядка 0,2 Ом на миллиметр ширины контактов. Падение напряжения на сопротивлении контактов в области насыщения тока около 0,5 В. Исследования ВАХ проводили на целой пластине с помощью зондовой станции при комнатной температуре.

При протекании тока вдоль нитей наблюдается перегиб ВАХ в области непосредственно перед насыщением тока, этот перегиб отсутствует на ВАХ при протекании тока поперек нитей. При протекании тока поперек нитей наблюдается повторяющаяся неустойчивость ВАХ после достижения определенного порога по напряженности электрического поля, в то время как "параллельная" ВАХ остается стабильной и до более высоких значений электрического поля, вплоть до теплового пробоя. На рис. 2 приведена "параллельная" ВАХ с увеличенным фрагментом перегиба, а на рис. 3 "перпендикулярная" ВАХ с увеличенным фрагментом области нестабильности.

Обнаруженные особенности ВАХ можно предположительно связать с различиями потенциального рельефа, который образовали ионизованные атомы олова в нанонитях для направлений протекания тока вдоль и поперек нанонитей. Наличие перегиба на "параллельной" ВАХ может быть обусловлено делокализацией в сильном электрическом локализованных состояний, возникших поле вследствие непериодического расположения атомов олова в нанонитях. В электрическом поле, направленном вдоль нанонитей, потенциальные барьеры для локализованных состояний относительно невысоки, и происходит вовлечение этих состояний в электрический ток. Нестабильность "перпендикулярных" BAX свидетельствует о наличии более глубокого потенциального рельефа при протекании тока перпендикулярно нанонитям и может иметь то же происхождение, что и нестабильности тока в сверхрешетках, составленных из гетеропереходов, которые обусловлены образованием доменов [3] или резонансным туннелированием [4].

Таким образом, обнаруженные особенности вольт-амперных характеристик в дополнение к их

анизотропии свидетельствуют о разном потенциальном рельефе для протекания тока вдоль и поперек нанонитей. Дальнейшее изучение нестабильности тока, возникающей при его протекании перпендикулярно нанонитям (при комнатной температуре!), может привести к созданию полупроводниковых генераторов электрических колебаний.

Работа выполняется в рамках контракта № 16.513.11.3045 от 12 апреля 2011 г. по заказу Минобрнауки России.

Список литературы

1. Сеничкин А. П., Бугаев А. С., Ячменев А. Э. Вольтамперные характеристики системы нанонитей из атомов олова, встроенные в кристалл арсенида галлия // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 12. С. 11—12.

2. Сеничкин А. П., Бугаев А. С., Ячменев А. Э. Изучение декорирования оловом краев террас вицинальной поверхности арсенида галлия методом дифракции быстрых электронов "на отражение" // XIV Национальная конференция по росту кристаллов, Москва, 6—10 декабря 2010 г.: Тезисы докладов. Т. 2. М.: Изд. ИК РАН, 2010. С. 110.

3. Kastrup J., Klann R., Grahn H. T., Ploog K. et al. Selfoscillation of domains in doped GaAs-AlAs superlattice // Phys. Rev. B. November 1995. V. 52, N 19. P. 13761–13766.

4. **Мурзин В. Н., Митягин Ю. А.** Резонансное туннелирование, электрические и оптические явления в длиннопериодных полупроводниковых сверхрешетках // Успехи физических наук. 1999. Т. 169, № 4. С. 464—467.

CONTENTS

Verner V. D., Maltsev P. P., Saurov A. N. *MEMS and the Third Industrial Revolution*.....2 Based on content analysis of a number of international conferences held in early 2012, shows a decisive role in the development of MEMS third industrial revolution.

Keywords: microelectromechanical systems, wireless sensors, global project, internet of things, monitoring, industrial revolution

Keywords: carbon tubes, porous aluminum oxide, nanosized structures, electrochemical processes

Keywords: terahertz technology, quantum cascade laser, quasiperiodic structure, Fibonacci sequence, Thue–Morse sequence, superlattice

Keywords: nanoionics, nanoionic devices, solid electrolytes, advanced superionic conductors, blocking heterojunctions, fast ion transport, computer modeling, hidden and observable variables, detailed balance, kinetic equation

Keywords: amorphous nuclear structure, systems of the iterated functions, radial functions of distribution

The results of the laser obtaining of semiconductor nanoparticles by continuous laser irradiation of near-IR range (up to 10^6 W/cm^2) on a massive sample PbX in the liquid are demonstrated. The placing of PbX quantum dots on a substrate was made by the method of droplet deposition. Using a simulation model the formation's features of deposited layers in the process of evaporation were described. **Keywords:** semiconductor particles, colloidal solution, the Monte-Carlo method

Keywords: gyrovertical, micromechanical sensitive elements, Allan variance

Keywords: multilayer antenna, multilayer printed antenna, aperture coupled antenna, phased array, dual-frequency, circular or elliptical polarized antenna radiation

- the instability of electrical current arise after saturation in high electrical fields if the current is measured across the nanothreads.

Keywords: nanostructures, quantum wires, quantum threads, molecular beam epitaxy

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

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 Т. Н. Погорелова. Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 17.09.2012. Подписано в печать 22.10.2012. Формат 60×88 1/8. Заказ MC1112.

Цена договорная Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз».

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