

ЧИТАТЕЛЮ О ЖУРНАЛЕ

В данном номере журнала частично опубликованы материалы предстоящей Всероссийской конференции с международным участием по современным проблемам разработки и применения сенсоров и элементной базы микросистемной техники "Сенсоры и микросистемы" (СЕНСОР-2000), которая пройдет 21-23 июня 2000 г. в Санкт-Петербурге.

Конференция является третьей из серии проходивших в Санкт-Петербурге конференций "Химические сенсоры 89" (1989 г.) и MST-SENSOR TECHNO-93 (1993 г.).

В третий день работы конференции, 23 июня, будет проведена специальная сессия на английском языке "Russian sensors and MST in the 21-th century", спонсируемая в рамках международной программы Европейского сообщества в области микросистемной техники "NEXUS", на которой будут представлены достижения и перспективы российских и европейских ученых в области разработки и создания элементной базы микросистемной техники.

В России термин "микросистемная техника" (microsystems engineering) стал использоваться в официальных документах после принятия в 1996 г. "Перечня критических технологий Федерального уровня".

Вашему вниманию предлагается рубрикация журнала, которая отражает первые пробы систематизации основных проблем микросистемной техники. С признательностью примем Ваши замечания и предложения.

Следует сказать, что до сих пор не предпринимались попытки унификации и уточнения терминологии в области микросистемной техники. Часть ее заимствована из микроэлектроники, часть из машиноведческих и электротехнических дисциплин, не всегда проведены качественные и количественные границы между отдельными терминами. Этой проблеме также планируется уделить серьезное внимание на страницах журнала.

Аннотации статей журнала на русском и английском языках доступны по сети Internet по адресу: <http://www.mirea.ru/microsystems>

Подписаться на второе полугодие можно в отделениях связи (индекс по каталогу Роспечати 79495) или непосредственно в редакции (107076, Москва, Строгинский пер., 4; тел. 269-55-10, 269-55-97).

РУБРИКИ ЖУРНАЛА "МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"

Рубрика	Ориентировочное содержание публикации
Информационные технологии, конструирование и моделирование объектов МСТ	САПР объектов МСТ, моделирование объектов МСТ и их производства с учетом эффекта масштабирования
Материаловедческие и технологические основы МСТ	Традиционные и перспективные материалы и технологии для объектов МСТ, в том числе: <ul style="list-style-type: none"> • материалы поверхностной и объектной микромеханики • адаптивные "умные" материалы • специальные технологии МСТ (LIGA-технологии, корпускулярно-лучевое микроформообразование, волоконная технология) • нанотехнология
Элементная база микросистемной техники	<ul style="list-style-type: none"> • Сенсоры и трансдьюсеры • Исполнительные устройства (микромеханизмы, микроинструменты) • Источники энергии и движения (микродвигатели, микротурбины)
Типы микросистем	<ul style="list-style-type: none"> • Микроэлектромеханические системы • Оптомеханические микросистемы • Биотехнические микросистемы, биочипы • Микросистемы энергообеспечения • Технологические микросистемы • Мини- и микроробототехнические системы
Применение объектов микросистемной техники	<ul style="list-style-type: none"> • Конструирование приборов и машин (макросистем) на основе элементной базы • Сборка макросистем на основе элементной базы МСТ • Испытания, сертификация и эксплуатация макросистем, созданных на основе МСТ
Информация	Конференции, совещания, выставки, новости науки и техники, обзоры специальной литературы и т.п.

УДК 37

В.В. Лучинин, д-р техн. наук, Ю.М. Таиров, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

К ВОПРОСУ ОБ ОРГАНИЗАЦИИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ "МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"

Отражены приоритеты отечественной высшей школы в подготовке специалистов по ряду дисциплин, определяющих научно-технический прогресс. Предложено определение области профессиональной деятельности дипломированного специалиста по микросистемной технике, дан перечень специальностей, реализуемых в рамках данного направления подготовки специалистов, а также перечень и содержание специальных дисциплин, необходимых для подготовки в области МСТ.

Страны, определяющие научно-технический прогресс, при установлении своих государственных приоритетов используют термин "критические технологии". За скромным перечнем критических технологий скрыт уровень интеллектуального потенциала нации и способность государства обеспечить его развитие. Известно, что наиболее значимые научно-технические прорывы происходят на стыке наук. Так было в начале шестидесятых годов, когда объединение потенциалов физики, химии и информатики определило развитие *микроэлектроники* – базиса современных высоконтелекоммуникационных систем.

Конец XX века подарил нам фактически вторую, вслед за созданием интегральных схем, революцию на микроуровне, и цеховая легенда – "Сказ о тульском Левше и стальной блохе" стали явью на рубеже XXI века [1]. Как уже отмечалось в работах [2-4], в основе междисциплинарного научно-технического прорыва, формируемого промышленно развитыми странами, лежит системная интеграция классических принципов электроники, физики твердого тела, механики, оптики, электротехники, химии и биологии, реализуемая в технических решениях на микроуровне с широким использованием материаловедческой и технологической базы электроники и микроэлектроники. Данное направление получило название "*микросистемная техника*". Позволим повторить определение микросистемной техники, впервые представленное одним из авторов данной статьи в работе [2]. *Микросистемная техника (МСТ)* – это научно-техническое направление, целью которого является создание в ограниченном объеме твердого тела или на его поверхности микросистем, представляющих собой упорядоченные композиции

областей с заданным составом, структурой и геометрией, статическая или динамическая совокупность которых обеспечивает реализацию процессов генерации, преобразования, передачи энергии и движения в интеграции с процессами восприятия, обработки, трансляции и хранения информации при выполнении запрограммированных операций и действий в требуемых условиях эксплуатации с заданными функциональными, энергетическими, временными и надежностными показателями.

В мировой практике для обозначения этого направления наиболее часто используются следующие понятия и термины: США – MEMS и MOEMS (микроэлектромеханические и микрооптоэлектромеханические системы); Япония – MICROMACHINES (микромашины); европейские страны – MST – *microsystem technology* (дословно технология микросистем). В России с 1996 года в "Перечне критических технологий Федерального уровня" официально используется термин "*микросистемная техника*" (*microsystems engineering*).

Мировой рынок микросистемной техники является наиболее динамичным и ежегодный прирост продукции составляет 20 %, что по данным организации при Европейской комиссии по проблемам развития микросистемной техники в Европе "NEXUS" обеспечит к 2002 году ежегодный объем реализации изделий микросистемной техники до 38 млрд. долл. США [5].

Одним из важнейших элементов обеспечения развития нового научно-технического направления, наряду с материально-технической базой, является кадровый потенциал, который формируется в рамках научных и научно-педагогических школ. Так, еще до открытия транзистора в Ленинградском электротехническом институте (ныне Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет) в 1946 году при поддержке академика А.Ф. Иоффе по инициативе известного отечественного ученого, трижды лауреата государственных премий Н.П. Богородицкого была создана кафедра диэлектриков и полупроводников (с 1995 года кафедра микроэлектроники), которая в 1952 году выпустила первых инженеров по специальности 0604 "Полупроводники и диэлектрики" [6]. С 1961 года кафедра стала выпускающей по специальности 0629 "Полупроводниковые приборы".

Особое внимание в то время (исходя из потребностей страны) уделялось курсам "Электротехнические материалы" и "Материалы радиоэлектронной техники". Известно, что одним из решающих этапов, определивших развитие микросистемной техники, являлось создание планарного электростатического двигателя, разработанного в США в конце 80-х годов М. Мехрегани. Фотографии этого двигателя на фоне острия иглы, обошли практически все издания мира [7]. Однако прообраз данного электростатического двигателя был создан на кафедре диэлектриков и полупроводников ЛЭТИ еще в конце 50-х годов в виде так называемого диэлектрического двигателя, не имеющего магнитных элементов [8]. Впервые практически было использовано явление вращения диэлектрика в электрическом поле, которое наблюдал в 1896 году немецкий исследователь Г. Квинке. Эта высокотехнологичная отечественная

разработка была удостоена золотой медали в 1958 году на Международной выставке в Брюсселе, где она выставлялась наряду с такими отечественными экспонатами, как модель первого атомного ледокола или станок с числовым программным управлением.

Анализируя современное состояние в области микросистемной техники, можно наблюдать своеобразный материаловедческий электротехнический ренессанс, но уже на микроуровне. Базисом функционирования элементной базы микросистемной техники являются так называемые функционально-активные и адаптивные "умные" материалы, использующие пьезоэлектрические и магнитные эффекты, электростатические явления, эффекты памяти формы.

В основе технологии элементной базы микросистемной техники лежат интегрально-групповые экономически эффективные принципы производства, широко используемые при создании изделий электронной техники. Для эффективного применения элементной базы микросистемной техники необходима ее конструкторская и технологическая интеграция с элементной базой микроэлектроники, основой информационного и энергетического обеспечения систем.

Все это позволило нам определить возможную область профессиональной деятельности будущего дипломированного специалиста в области микросистемной техники следующим образом: **исследование, разработка, создание и применение сверхминиатюрных приборов, механизмов и микромашин на основе системной интеграции электроники, электротехники, механики, оптики, теплотехники, химии и биологии, реализуемых в конструкторско-технологических решениях на микроуровне с широким использованием интегрально-групповых экономически эффективных принципов производства.**

Учитывая, что микросистемная техника относится к "критическим" направлениям науки и техники, определяющим конкурентоспособность наиболее наукоемких отраслей промышленности, и базируется, в первую очередь, на материаловедческо-технологическом базисе микроэлектроники, представляется возможным дополнить примерный перечень направлений подготовки дипломированных специалистов в рамках Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 41 "Электроника и микроэлектроника" специальностью "Микросистемная техника". Перечень специальностей, реализуемых в рамках данного направления подготовки специалистов, может быть расширен следующим образом:

- 180600 – светотехника и источники света;
- 071400 – физическая электроника;
- 200100 – микроэлектроника и твердотельная электроника;
- 200300 – электронные приборы и устройства;
- 200400 – промышленная электроника;
- 200500 – электронное машиностроение;
- ... – микросистемная техника.

Область профессиональной деятельности инженера по направлению "Электроника и микроэлектроника"

включает в себя совокупность средств, способов и методов человеческой деятельности, направленной на исследование, разработку и производство материалов и изделий электроники и микросистемной техники, совершенствование технологий их получения, а также проектирование и применение приборов и устройств. Объектами профессиональной деятельности выпускника в зависимости от содержания основной образовательной программы подготовки (специальности) являются материалы, компоненты, приборы и устройства электроники и микросистемной техники, технологические процессы их изготовления, методы исследования, проектирования и конструирования, диагностическое и технологическое оборудование, математические модели процессов и объектов электроники и микросистемной техники, алгоритмы решения типовых задач, относящихся к профессиональной сфере.

В рамках разработки требований к обязательному минимуму содержания основных образовательных программ при подготовке дипломированного специалиста по направлению "Электроника и микроэлектроника" для специальности "**Микросистемная техника**" может быть предложен перечень специальных дисциплин, представленный ниже.

СД. 01. Материалы микросистемной техники (100 ч):

- классификация материалов микросистемной техники: конструкционные, функционально активные и адаптивные;
- критерии выбора и совместимости материалов: кристаллохимическая и термохимическая совместимость, механическая, тепловая и электрическая стойкость, механическая и термомеханическая усталость, электрическая деградация;
- конструкционные материалы: материалы для механических конструкций, электрических и оптических связей; функционально активные материалы для электростатических, электромагнитных, пьезоэлектрических и термоэлектрических преобразователей информации энергии и движения;
- адаптивные материалы: активные диэлектрики, сплавы с памятью формы, биоорганические материалы, самоорганизующиеся среды.

СД. 02. Микроэлектромеханика (100 ч):

- механические свойства твердых тел;
- поле деформации и напряжений;
- эффекты масштабирования в микромеханике;
- виды нагрузок: статические, колебания, линейные ускорения, полигармонические и случайные воздействия, удар, температурные воздействия;
- структура и виды механизмов и деталей машин: мембранные, балки, пружины, зубчатые и фрикционные передачи, муфты;
- законы классической электромеханики, электромеханические преобразователи, эффекты масштабирования в микроэлектромеханике;
- электромагнитные и электростатические объемные и планарные микродвигатели;
- пьезоэлектрические преобразователи;
- микропьезодвигатели;
- микропневмопреобразователи.

СД. 03. Микрооптика (100 ч):

- основные положения геометрической, волновой, квантовой, нелинейной и молекулярной оптики;

- размерные эффекты; планарная и объемная элементная база микрооптики: твердотельные источники и приемники излучения, интерференционные покрытия, управляемые зеркала и дифракционные решетки, линзы Френеля, Фурье-преобразующие линзы, оптические резонаторы, электро-, акусто-, магнитооптические модуляторы, планарные и объемные волноводы, оптические кабели и разъемы;

• оптика движущихся тел: эффекты Доплера, Физо, Саньяка;

- микрооптомеханические и интегрально-оптические схемы.

СД.04. Микросхемотехника (150 ч):

- классификация и стандартизация интегральных микросхем;

• элементная база интегральных микросхем: физическая структура, топология, законы масштабирования;

• схемотехника цифровых интегральных микросхем: базовые логические элементы, схемотехническая реализация основных логических функций, типовые и функциональные узлы на основе логических элементов, цифровые интегральные схемы на основе динамических логических элементов, постоянные и оперативные запоминающие устройства;

• схемотехника аналоговых интегральных схем: операционные усилители, схемотехническая реализация математических операций, компараторы, аналоговые переключатели, активные фильтры;

• цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи;

• микропроцессоры;

• схемотехническая реализация ИМС на основе базовых матричных кристаллов и программируемых логических матриц;

• логическое схемотехническое и топологическое проектирование ИМС;

• системы автоматизированного проектирования;

• перспективные направления традиционной и нетрадиционной микросхемотехники;

• элементная база для сверхскоростной обработки информации: логические элементы на основе соединений группы A^3B^5 и сверхпроводников, приборы на поверхностных акустических и магнитостатических волнах;

• вычислительные среды с нейроподобной архитектурой;

• ассоциативные принципы обработки информации, самоорганизация.

СД. 05. Компоненты микросистемной техники (175ч):

• классификация объектов микросистемной техники: сенсоры, управляемые электрорадио- и оптоэлектромеханические компоненты, микроустройства для хранения информации, микромашины, аналитико-технические микросистемы, микро- и наноинструмент, миниатюрные транспортные средства, минироботы;

• сенсоры: для контроля основных физических и химических параметров сред, сенсоры ориентации, навигации и управления;

• биосенсоры для медико-биологических целей;

• миниатюрные управляемые электрорадиомеханические и оптоэлектромеханические компоненты: конденсаторы, катушки индуктивности, резисторы,

реле, резонаторы, зеркала, линзы, модуляторы, затворы, фильтры, фото переключатели, микродиски, оптомеханические и интегрально-оптические схемы;

• микромашины: микродвигатели, микрогенераторы, микротурбины, приводы движения, системы микроперемещения;

• микроманипуляторы;

• аналитические микросистемы, матричные и микрофлюидные чипы, микрохроматографы, миниатюрные масс-спектрометры;

• технические микросистемы: микрореакторы, микроклапаны, микродозаторы, кластерные технологические микросистемы, микро- и наноинструмент, миниатюрные транспортные средства и мини-роботы.

СД.06. Проектирование микросистем (150 ч):

- математические модели элементной базы микросистемной техники;

• теория подобия и эффекты масштабирования;

• механические модели в электромеханике: механическое равновесие, уравнение баланса динамических величин, уравнение движения, термомеханические, статические и динамические модели мембранных, балочных, струн;

• физико-топологические модели базовых элементов поверхностной и объемной микромеханики;

• модели микросистем с электрическими и магнитными полями: полевые уравнения, краевые задачи, общие уравнения для электромагнитного и пьезоэлектрического преобразователя;

• модели течения жидкости и газа в микрообъемах и микрокапиллярах;

• имитационное динамическое моделирование микросистем;

• программные средства обеспечения САПР компонентов микросистемной техники;

• интеграция элементной базы микроэлектромеханики, микрооптики и микроэлектроники при проектировании микросистем.

СД. 07. Технология микросистем (175 ч):

• организационно-технологические основы производства элементной базы микроэлектроники, микроэлектромеханики, микрооптики;

• базовые технологические операции нанесения, удаления и модификации материалов, литографические процессы;

• специальные технологические операции поверхностной микромеханики: "жертвенное" слои, избирательное травление;

• специальные технологические операции объемной микромеханики: ориентационно-чувствительное жидкостное и высокопроизводительное сухое ионно-плазменное травление, стоп-слои;

• LIGA-технология: синхротронное излучение, гальванопластика, микропрессование;

• корпскулярно-лучевое формообразование: микростереолитография, лазерное осаждение и полимеризация;

• процессы сборки микросистем;

• производственная гигиена: чистота материалов и помещений;

• ЕСТД и ее применение;

• системный подход к управлению качеством продукции.

СД. 08. Испытания микросистем (100 ч):

- номенклатура показателей качества материалов и компонентов микросистемной техники;
- выбор модели для определения качества продукции;
- классификация методов испытаний: испытания на воздействие температуры, влажности, механические и радиационные испытания;
- ускоренные испытания;
- базовое контрольно-измерительное и испытательное оборудование;
- методики проведения испытаний и обработки результатов;
- стандартизация и сертификация компонентов микросистемной техники;
- гармонизация национальных стандартов испытаний и качества продукции с международными.

ДС. Дисциплины специализаций (760 ч):

Суммарный объем учебных часов по специальным дисциплинам соответствует проекту разработанного стандарта подготовки дипломированных специалистов по направлению "Электроника и микроэлектроника".

В качестве возможных специализаций при подготовке инженеров по специальности "Микросистемная техника" могут быть "Микротехника" и "Нанотехника".

В рамках единых европейских образовательных программ в настоящее время также принято решение об унификации образовательного процесса в области микросистемной техники с ориентацией на подготовку магистров: "Master of Science in Microsystems Engineering".

Представляется, что микросистемная техника для научно-технического процесса может иметь такое же значение, какое оказало появление микроэлектроники на становление и современное состояние ведущих областей науки и техники.

Имеющиеся в России научно-технический и кадровый потенциалы позволяют приступить в 2000 году к подготовке дипломированных специалистов по специальности "Микросистемная техника" в рамках направления "Электроника и микроэлектроника". Организация образовательного процесса по данной специальности будет также способствовать структурной перестройке экономики России с учетом мирового опыта и приоритетов ее социально-экономического развития.

Список литературы

1. Лучинин В.В. Быть о механической блохе // Газета "Поиск", 1997, №19-20, С.6.
2. Лучинин В.В. Микросистемная техника. Направления и тенденции развития // Научное приборостроение РАН. 1999. Т. 9, № 1. С. 3-18.
3. Климов Д.М., Васильев А.А., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999 № 1. С. 3-6.
4. Лучинин В.В., Таиров Ю.М., Васильев А.А. Особенности материаловедческого и технологического базиса микросистем // Микросистемная техника, 1999. № 1. С. 7-11.
5. NEXUS. Market analysis for microsystems, 1996-200 2//MST News, 1998, №3. Р. 38-41.
6. Пасынков В.В., Таиров Ю.М. Кафедре микроэлектроники 50 лет // Петербургский журнал электроники. Вып. 3, 1996. С. 3-9.
7. Стикс Г. Микронные механизмы // В мире науки, 1993. № 1 С. 68.
8. Карпов Ю.С., Красноперое В.А., Окунев Ю.Т., Пасынков В.В. О движении диэлектриков в электрическом поле // Физика диэлектриков // Тр. 2-й Всесоюзной конф., ноябрь, 1958, М.: Изд-во РАН. 1960. С. 124-131.

УДК 621.317

Н.В. Корнеев, аспирант, **В.К. Неволин**, д-р физ.-мат. наук, проф., Московский государственный институт электронной техники (Технический университет) e-mail vkn@miee.ru

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА С КВАЗИОДНОМЕРНЫМИ МИКРОКОНТАКТАМИ

Описаны макеты устройств, созданных методами зондовой нанотехнологии, в том числе макеты датчика рабочего интервала температур и ограничения силы проходящего тока, макеты перестраиваемых нанодиодов – нанодинисторов вертикального типа, макеты планарных нанодиодов. Основу устройств составляют элементы с нанометровыми размерами – квазиодномерные микроконтакты, проявляющие нелинейные свойства проводимости, в том числе явление квантования сопротивления при нормальных температурах.

ВВЕДЕНИЕ

Задача уменьшения линейных размеров используемых элементов – одна из основных в микросистемной технике. Создание элементов устройств с характерными размерами порядка единиц и десятков нанометров качественно меняет электронику явлений и переводит ее в новую область – наноэлектронику [1]. Изменяются и физические явления, лежащие в основе работы элементов – они будут работать преимущественно на принципах квантовой механики.

Традиционные методы, включающие создание масок на поверхности полупроводниковых пластин с последующим применением микролитографий все более высокого разрешения, в том числе рентгене-, электроно- и ионной литографий, а также синхротронного излучения, возможно приведут к созданию элементов с нанометровыми поперечными размерами [2].

Альтернативным подходом к созданию функциональных элементов нанометровых размеров является привлечение методов сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии, в основе которой лежит использование зонда с минимально возможным радиусом острия для "осаждения" поверхности исследуемых образцов. Зонд можно использовать не только для визуализации объектов на подложке, но и для формирования их в нанометровых областях [3]. Совокупность способов и приемов создания функциональных элементов нанометровых размеров на поверхности подложек с помощью зонда с возможностью одновременной их визуализации и контроля называют туннельно-зондовой нанотехнологией.

В статье описаны некоторые результаты создания макетов дискретных элементов путем модификации

СД. 08. Испытания микросистем (100 ч):

- номенклатура показателей качества материалов и компонентов микросистемной техники;
- выбор модели для определения качества продукции;
- классификация методов испытаний: испытания на воздействие температуры, влажности, механические и радиационные испытания;
- ускоренные испытания;
- базовое контрольно-измерительное и испытательное оборудование;
- методики проведения испытаний и обработки результатов;
- стандартизация и сертификация компонентов микросистемной техники;
- гармонизация национальных стандартов испытаний и качества продукции с международными.

ДС. Дисциплины специализаций (760 ч):

Суммарный объем учебных часов по специальным дисциплинам соответствует проекту разработанного стандарта подготовки дипломированных специалистов по направлению "Электроника и микроэлектроника".

В качестве возможных специализаций при подготовке инженеров по специальности "Микросистемная техника" могут быть "Микротехника" и "Нанотехника".

В рамках единых европейских образовательных программ в настоящее время также принято решение об унификации образовательного процесса в области микросистемной техники с ориентацией на подготовку магистров: "Master of Science in Microsystems Engineering".

Представляется, что микросистемная техника для научно-технического процесса может иметь такое же значение, какое оказало появление микроэлектроники на становление и современное состояние ведущих областей науки и техники.

Имеющиеся в России научно-технический и кадровый потенциалы позволяют приступить в 2000 году к подготовке дипломированных специалистов по специальности "Микросистемная техника" в рамках направления "Электроника и микроэлектроника". Организация образовательного процесса по данной специальности будет также способствовать структурной перестройке экономики России с учетом мирового опыта и приоритетов ее социально-экономического развития.

Список литературы

1. Лучинин В.В. Быть о механической блохе // Газета "Поиск", 1997, №19-20, С.6.
2. Лучинин В.В. Микросистемная техника. Направления и тенденции развития // Научное приборостроение РАН. 1999. Т. 9, № 1. С. 3-18.
3. Климов Д.М., Васильев А.А., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999 № 1. С. 3-6.
4. Лучинин В.В., Таиров Ю.М., Васильев А.А. Особенности материаловедческого и технологического базиса микросистем // Микросистемная техника, 1999. № 1. С. 7-11.
5. NEXUS. Market analysis for microsystems, 1996-200 2//MST News, 1998, №3. Р. 38-41.
6. Пасынков В.В., Таиров Ю.М. Кафедре микроэлектроники 50 лет // Петербургский журнал электроники. Вып. 3, 1996. С. 3-9.
7. Стикс Г. Микронные механизмы // В мире науки, 1993. № 1 С. 68.
8. Карпов Ю.С., Красноперое В.А., Окунев Ю.Т., Пасынков В.В. О движении диэлектриков в электрическом поле // Физика диэлектриков // Тр. 2-й Всесоюзной конф., ноябрь, 1958, М.: Изд-во РАН. 1960. С. 124-131.

УДК 621.317

Н.В. Корнеев, аспирант, **В.К. Неволин**, д-р физ.-мат. наук, проф., Московский государственный институт электронной техники (Технический университет) e-mail vkn@miee.ru

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА С КВАЗИОДНОМЕРНЫМИ МИКРОКОНТАКТАМИ

Описаны макеты устройств, созданных методами зондовой нанотехнологии, в том числе макеты датчика рабочего интервала температур и ограничения силы проходящего тока, макеты перестраиваемых нанодиодов – нанодинисторов вертикального типа, макеты планарных нанодиодов. Основу устройств составляют элементы с нанометровыми размерами – квазиодномерные микроконтакты, проявляющие нелинейные свойства проводимости, в том числе явление квантования сопротивления при нормальных температурах.

ВВЕДЕНИЕ

Задача уменьшения линейных размеров используемых элементов – одна из основных в микросистемной технике. Создание элементов устройств с характерными размерами порядка единиц и десятков нанометров качественно меняет электронику явлений и переводит ее в новую область – наноэлектронику [1]. Изменяются и физические явления, лежащие в основе работы элементов – они будут работать преимущественно на принципах квантовой механики.

Традиционные методы, включающие создание масок на поверхности полупроводниковых пластин с последующим применением микролитографий все более высокого разрешения, в том числе рентгене-, электроно- и ионной литографий, а также синхротронного излучения, возможно приведут к созданию элементов с нанометровыми поперечными размерами [2].

Альтернативным подходом к созданию функциональных элементов нанометровых размеров является привлечение методов сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии, в основе которой лежит использование зонда с минимально возможным радиусом острия для "осаждения" поверхности исследуемых образцов. Зонд можно использовать не только для визуализации объектов на подложке, но и для формирования их в нанометровых областях [3]. Совокупность способов и приемов создания функциональных элементов нанометровых размеров на поверхности подложек с помощью зонда с возможностью одновременной их визуализации и контроля называют туннельно-зондовой нанотехнологией.

В статье описаны некоторые результаты создания макетов дискретных элементов путем модификации

среды в зазоре между туннельным зондом и подложкой для получения вертикальных квазиодномерных контактов и результаты создания макетов с планарными микроконтактами в атомно-силовом микроскопе с помощью кантилевера с проводящим зондом.

МАКЕТЫ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КВАЗИОДНОМЕРНЫХ МИКРОКОНТАКТОВ

Вертикальные микроконтакты, как правило, формируются между горизонтальной проводящей подложкой и расположенным вертикально над ней туннельным зондом. В нашем случае формирование микроконтактов проводилось в жидком диэлектрике. В качестве модельного диэлектрика была выбрана эпоксидная диановая смола ЭД-20, предварительно обеспеченная в форвакууме с последующей многочасовой электроочисткой. Было предположено, что в локальном электрическом поле между подложкой и игольчатым электродом молекулы эпоксида образуют составные длинные молекулярные цепочки (каналы проводимости), на которые будет слабо влиять их тепловое движение (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) участка цепи, состоящего из полированной подложки из коррозионно-стойкой стали диаметром 6 мм и толщиной 0,5 мм, капли эпоксидной смолы и игольчатого электрода (зонда) из вольфрамовой проволоки диаметром 1 мм, радиусом острия около 20 нм не различаются при зазорах между электродами 1 – 240 нм. После полимеризации эпоксидной смолы с помощью отвердителя ПЭПА (полиэтилен-полиамин) каждый элемент приобретал вид, изображенный на рис. 2 (см. вторую сторону обложки), и его сопротивление при нормальной температуре оставалось неизменным и составляло около 10 Ом. Вертикальные микроконтакты с металлическими электродами пропускали токи порядка 100 мА, в частности, через один из них непрерывно пропускался ток 96 мА в течение месяца. Наблюдаемые закономерности проводимости микроконтактов можно объяснить, если предположить, что имеет место баллистический режим протекания тока с помощью резонансно-туннелирующих электронов [4]. Наиболее убедительные доказательства наблюдения квантовых свойств проводимости при нормальной температуре были получены тогда, когда элементы с микроконтактами медленно нагревались или растягивались и происходило скачкообразное переключение проводимости. Измеренные скачки сопротивления составляли $(1,2 \pm 0,3) \cdot 10^4$ Ом, что согласуется с квантовым сопротивлением $\pi \hbar/e^2 = 1,3 \cdot 10^4$ Ом. Полное выключение проводимости элементов происходило как при повышении температуры, так и при охлаждении их ниже нормальной. Например, выключение происходило при температуре $37,2 \pm 0,05$ °C и при температуре $5,4 \pm 0,05$ °C, при этом сопротивление изменялось от 10 Ом (оно практически неизменно в указанном температурном интервале) до значений, превышающих 10 МОм. Эти свойства вертикальных микроконтактов позволили изготовить что собственная электрическая емкость диодов мала за

действующий макет датчика (рис. 3, см. вторую сторону обложки) рабочего интервала температур и ограничения силы проходящего тока ($I_{\max} = 69$ мА, $T_{\max} = 37,2$ °C, $T_{\min} = 5,4$ °C). Для этого разбирался стандартный стеклянный плавкий предохранитель и в один из колпачков вклеивался проводящим kleem элемент, изображенный на рис. 2. Это было, по-видимому, одно из первых двухэлектродных изделий, изготовленных с помощью сканирующего туннельного микроскопа, и оно превосходило по своим характеристикам зарубежные аналоги, в частности, предохранители "Мультифильт" швейцарской фирмы "Бурнс".

Если материал подложки более пластичен, чем зонд из вольфрама, то можно сформировать вертикальные микроконтакты из материала подложки путем касания острием подложки, пропускания тока определенной силы и медленным отведением зонда от подложки с одновременным контролем ВАХ [5]. Возможность создания квазиодномерных микромостиков между туннельным зондом и подложкой обусловлена тем, что радиус острия зонда составляет 10-20 нм, а расстояния между ними менее 1 нм (при сжатии их на воздухе). В связи с этим между иглой и подложкой можно достаточно просто создавать электрические поля до 10^8 В/см, сравнимые с внутриатомными, и пропускать кратковременно электрические токи до 10^9 А/см² в обычных атмосферных условиях. Это позволяет, в частности, провести локальную пластическую деформацию металлических подложек и плавно изменить геометрические размеры перетяжек, находящихся в межэлектродном зазоре. Естественно, для фиксирования зонда относительно подложки необходима диэлектрическая матрица, для которой вновь использовалась эпоксидная смола.

При растяжении перетяжек вплоть до их разрыва можно наблюдать множество ВАХ: от линейных, когда зонд касается поверхности подложек, до нелинейных с разной степенью крутизны характеристик. Перед самым разрывом микромостиков наблюдаются S-образные ВАХ с участками отрицательной дифференциальной проводимости. Проводя полимеризацию эпоксидной смолы, которая фиксирует положение зонда относительно подложки, можно было "зафиксировать" некоторую нелинейную характеристику элемента. Внешне элементы выглядели точно так же, как на рис. 2. Далее элемент помещался в специально изготовленный корпус, который позволял в некоторой мере его терmostатировать и перестраивать ВАХ путем растягивания элемента (рис. 4, см. вторую сторону обложки). При этом можно из "нанодиодной" характеристики получить "нанодинисторную" путем поворота фиксирующего винта. Если поместить макет перестраиваемого нанодиода-нанодинистора управляемый электронный термостат, который поддерживает заданную температуру с точностью $\pm 0,05$ °C, то устойчивость работы на-нодинистора существенно повышается.

На основе нанодинисторов возможно создание, в частности, генераторов и переключателей тока гигагерцевого диапазона частот. Применение нанодинисторов для генераторов гармонических колебаний выгодно тем, что значительного расстояния между макроэлектродами

ми, соединяющими микропроводник. Принимая конструкционную емкость $C_k = 10^{-3}$ пФ, отрицательное сопротивление диода в рабочей точке для золотой подложки $|R_g| \approx 10$ Ом, получаем предельную рабочую частоту диодов $\omega_p = (C_k R_g R)^{-1/2} \approx 10^3$ ГГц, где R - сопротивление, ограничивающее силу тока, протекающего через диод, $R \approx 10$ Ом, при этом возможная амплитуда силы тока ≈ 1 мА.

Заметим, что простейшие генераторы, состоящие из источника тока и нанодинистора, коммутирующие миллиамперные токи и работающие в гигагерцевом диапазоне частот, интересны для различных приложений.

МАКЕТЫ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ПЛАНАРНЫХ КВАЗИОДНОМЕРНЫХ МИКРОКОНТАКТОВ

Существенным недостатком вертикальных квазиодномерных контактов является то, что так или иначе нужно фиксировать зонд относительно подложки в диэлектрической матрице. Поскольку эффективная длина закрепления электродов друг относительно друга достаточно велика, то такие элементы являются весьма чувствительными к изменению температуры окружающей среды. Естественно, что планарные элементы с субмикронными размерами, расположенные на диэлектрической подложке будут практически иметь неизменные размеры при колебаниях нормальной температуры.

В основе технологии создания планарных элементов с манометровыми поперечными размерами лежит двухстадийный процесс. На первом этапе методами традиционной планарной технологии изготавливаются матричные кристаллы с контактными площадками и металлическими дорожками с минимально возможными поперечными размерами (менее 0,3 мкм) и толщиной менее 10 нм. На следующей стадии методами зондовой нанотехнологии формируются планарные микроконтакты путем уменьшения поперечного сечения проводящих дорожек. При этом существенно то, что для получения заданных электрических характеристик имеет значение геометрия перехода электродов-берегов в квазиодномерный микроконтакт. В настоящее время широко используются методы анодного зондового окисления проводящих дорожек с использованием адсорбата, покрывающего поверхности электродов и состоящего в основном из воды [6].

Одной из проблем при создании планарных квантовых микроконтактов является качество границ раздела. При формировании вертикальных микроконтактов в сканирующем тунNELЬНОМ микроскопе качество границы между квазиодномерным проводом и эпоксидной матрицей определяется процессами самоформирования структуры между зондом и проводящей подложкой. Экспериментальные результаты показывают, что качество границы высокое, поскольку квантовые эффекты устойчиво наблюдаются при нормальных температурах. В случае планарных проводников

границы раздела создаются в разных технологических операциях, и это создает дополнительные проблемы. Одним из заметных достижений в наблюдении квантования проводимости планарных микроконтактов при нормальных температурах являются результаты работы [7]. Авторы проводили зондовое окисление алюминиевых проводящих дорожек. Наблюдалось скачкообразное изменение проводимости микроконтакта во времени после выключения тока анодирования в цепи зонд-подложка. Остаточное окисление микроконтакта перед полным разрывом цепи (при полном окислении перемычки) происходит за счет превращения гидроксидов алюминия в оксиды. При этом поперечное сечение микроконтакта становится столь малым, что существенно возрастает "резкость" поперечного квантования энергии носителей тока.

Однако для создания и функционирования устройств на основе планарных микроконтактов существенна воспроизводимость характеристик элементов и стабильность их во времени. На рис. 5 (см. вторую сторону обложки) изображена топография центральной части одного из планарных элементов на кристаллах из полуизолирующего арсенида галлия размерами 1×1 мм, неизменные электрические характеристики которых наблюдаются в течение более трех месяцев. Планарные микроконтакты выполнены на титановых проводящих дорожках. Элементы изготавливались на зондовом микроскопе Solver P-47 компании НТ-МДТ. Все характеристики элементов являются нелинейными с различной крутизной, и предполагается исследовать их как в бескорпусном, так и в закорпированном варианте в смесителях СВЧ-диапазона частот.

* * *

Электронные устройства на основе квазиодномерных микроконтактов, несомненно, являются перспективными. Изучена малая часть возможностей микроконтактных элементов. Решение проблемы создания планарных элементов с использованием более совершенных зондовых технологий повысит качество элементов и создаст предпосылки для их интеграции с другими микроэлектронными системами на одном кристалле.

Список литературы

1. Bate R.T. Nanoelectronics // Solid State Technology. 1989. № 11. P. 101-108.
2. Smith H.I., Craighead H.G. Nanofabrication // Phys. Today. 1990. P.24-30.
3. Неволин В.К. Физические основы туннельно-зондовой нанотехнологии // Электронная промышленность, 1993. № 10. С. 8-15.
4. Бессольцев В.А., Неволин В.К. Проводимость полимерных микропроводников // Электронная техника. Сер. 3. "Микроэлектроника". 1989. №3. С. 58-61.
5. Волков А.Б., Неволин В.К. Нелинейные свойства точечных микроконтактов, формируемых туннельным зондом // Радиотехника и электроника. 1999. Т.44. № 11. С. 1373-1375.
6. Адамов Ю.Ф., Корнеев Н.В., Мокеров В.Г., Неволин В.К. Формирование и электрические свойства планарных 20-наноразмерных структур // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 13-16.
7. Snow E.S., Park D., Campbell P.M. Single-atom point contact devices fabricated with an atomic force microscope//Appl. Phys. Lett/ 1996. V. 69. №. 2. P. 269-271.

УДК 621.384.4

А.В. Корляков, канд. физ.-мат. наук, **В.В. Лучинин**, д-р техн. наук, **М.В. Четвергов**, аспирант,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет. Центр Микротехнологии и Диагностики
E-mail:cmid@eltech.ru

СЕНСОРЫ "ЖЕСТКОГО" УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ШИРОКОЗОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Обобщена информация о достижениях в области разработки и создания датчиков "жесткого" УФ излучения, способных работать в экстремальных условиях. Основное внимание уделено датчикам на основе фосфида галлия, нитридов галлия и алюминия, карбида кремния и алмаза.

Введение

В настоящее время в приборостроении резко возрос интерес к освоению ультрафиолетовой (УФ) области спектра в связи с интенсификацией работ по созданию полупроводниковых лазеров на основе композиций широкозонных материалов (InGaN/GaN - SiC, GaN/AlN - SiC) [4], что обеспечивает возникновение миниатюрной оптопары в ранее недостижимой области спектра. В связи с этим представляет несомненный интерес анализ современного состояния в области датчиков УФ излучения. Фотоприемники с чувствительностью в УФ диапазоне уже сейчас нашли широкое применение во многих областях науки и техники: астрофизические исследования в космосе, спектрональные исследования Земли, спектрофотометрия, колориметрия, медико-биологические исследования. Представляет интерес регистрация УФ излучения Солнца и искусственных источников ультрафиолета в области 180-400 нм и, в частности, в диапазонах А - 320-400 нм, В - 275-320 нм, С - 180-275 нм.

В качестве примеров потребности датчиков наиболее "жесткого" УФ излучения диапазона С может быть выделена диагностика "озоновых дыр" (на рис. 1 представлен спектр солнечного излучения, прошедшего к поверхности Земли при наличии озонаового слоя и в так называемой "озоновой дыре"), а также регистрация интенсивности облучения ультрафиолетом объектов, работающих в открытом космосе. В последнем случае к фотоприемникам УФ излучения могут предъявляться особые требования к стабильности параметров в условиях радиационного воздействия и возможности эффективного разделения при регистрации УФ излучения и космического радиационного фона.

Известно, что спектральная чувствительность фотоприемников в УФ области спектра определяется

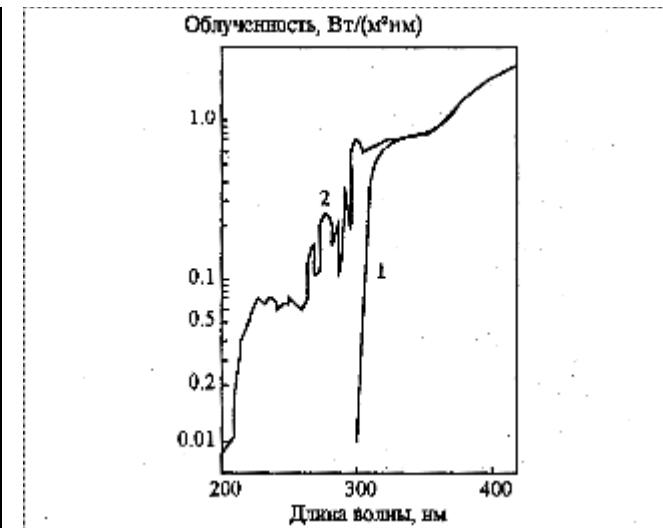


Рис. 1. Спектр солнечного излучения, прошедшего к поверхности Земли при наличии озонаового слоя (1) и в "озоновой дыре" (2) [5]

многими факторами, главным из которых является ширина запрещенной зоны базового материала. Для изготовления твердотельных УФ фотоприемников используются: кремний, широкозонные соединения $A^{III}B^{V}$ $A^{II}B^{VI}$, карбид кремния и алмаз. Для регистрации "жесткого" УФ наиболее перспективны материалы с широкой запрещенной зоной (более 3 эВ). Однако круг применяемых материалов определяется не только значением ширины запрещенной зоны. Необходимо учитывать такие факторы, как коэффициент отражения и коэффициент преломления материала в УФ области спектра. Фоточувствительность УФ фотоприемников существенно зависит от эффективности разделения носителей заряда, возбужденных коротковолновым светом в приповерхностной области; при этом жесткие условия накладываются на характеристики поверхности (малая плотность поверхностных состояний, низкая скорость поверхностной рекомбинации). При выборе исходного материала важную роль играет и уровень разработки технологии его получения, а также состояние методов обработки. Требование высокой фоточувствительности в УФ области спектра определяет и особенности конструкции фотоприемников [5].

Настоящая статья имеет цель обобщить информацию о современных достижениях в области разработки и создания датчиков "жесткого" УФ излучения диапазона С (180-275 нм), способных работать в экстремальных условиях. В обзор не вошли приборы на основе аморфного кремния и соединений А В. Основное внимание уделено датчикам на основе фосфида галлия, нитридов галлия и алюминия, карбида кремния и алмаза.

Твердотельные фоточувствительные элементы "жесткого" ультрафиолетового излучения

Твердотельные фотоприемники "жесткого" УФ излучения на основе широкозонных материалов реализуются в виде фоторезисторов, фотодиодов на

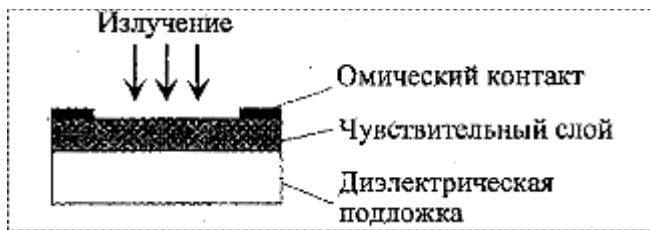


Рис. 2. Структура пленочного фотодиода

основе $p-n$ -переходов, $p-i-n$ -структур и диодов Шоттки, полевых фототранзисторов с барьером Шоттки или на базе МДП-структур.

Фоторезисторы. Они являются наиболее простым типом приемников излучения (рис. 2). Используется фоточувствительность материалов как в области собственного поглощения, так и в примесной области. Высокую селективность и избирательность спектральной чувствительности удается получить лишь у фоторезисторов, изготовленных на основе монокристаллических материалов.

К преимуществам фоторезисторов следует отнести относительную дешевизну изготовления, большой диапазон номиналов сопротивлений, а также простоту выполнения фоточувствительных элементов со сложной конфигурацией. Недостатками фоторезисторов являются значительная инерционность, температурная и времененная нестабильность характеристик. Среднее значение постоянной времени фоторезисторов лежит, как правило, в диапазоне от единиц микросекунд до сотен миллисекунд. С ростом освещенности инерционность уменьшается, что в первую очередь связано с увеличением проводимости.

Фоторезисторы на основе GaP обладают высокой чувствительностью в УФ области вплоть до $\lambda = 0,25$ мкм. Созданные на основе слоев GaP:Cu, выращенных методами жидкостной эпитаксии, такие фоторезисторы имеют высокий коэффициент усиления (рис. 3). Темновые и световые характеристики таких УФ фоторезисторов

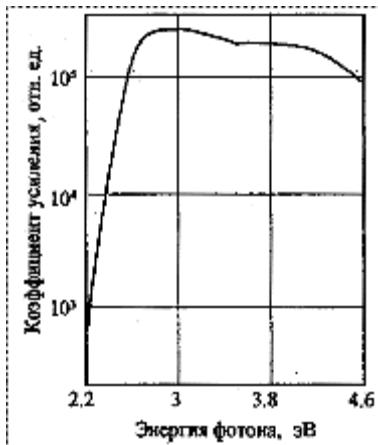


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления от энергии фотона для фоторезистора GaP:Cu

линейны до напряженности электрического поля 10^4 В/см. Спад фоточувствительности УФ фоторезисторов в 2 раза происходит на частотах модуляции света 400-800 Гц [5].

Фоторезисторы на основе нитрида галлия, нитрида алюминия и твердых растворов $Al_xGa_{1-x}N$ являются перспективными датчиками УФ излучения [6]. Варьируя соотношением Al/Ga в твердом растворе, можно получать датчики с различной спектральной чувствительностью в широком диапазоне спектра от 3,4 эВ (GaN) до 6,2 эВ (AlN). На рис. 4 изображены спектральные характеристики коэффициента пропускания нитрида галлия и фототока чувствительного элемента, созданного на основе GaN.

В Центре микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета на базе композиции AlN-Al₂O₃ была разработана технология изготовления датчиков наиболее коротковолнового УФ излучения. Разработанный датчик "жесткого" ультрафиолета (рис. 5) представляет собой фоторезистивную структуру, где в качестве чувствительной области выступает слой нитрида алюминия [7], который относится к наиболее широкозонным прямозонным материалам. Слои нитрида алюминия наносились двумя способами: методом ионно-химического осаждения [8] и методом сублимации в квазизамкнутом объеме [9]; при этом толщины слоев составляли 0,5-1,0 мкм. В качестве подложки были использованы пластины монокристаллического сапфира. Особенностью данной структуры является то, что функцию электродов выполняет слой вольфрама, причем формирование проводящей структуры осуществляется до нанесения слоя нитрида алюминия.

Разработанная конструкция датчика не требует нанесения защитных слоев, которые могут негативно отразиться на спектральной чувствительности прибора. На рис. 6 изображена спектральная характеристика

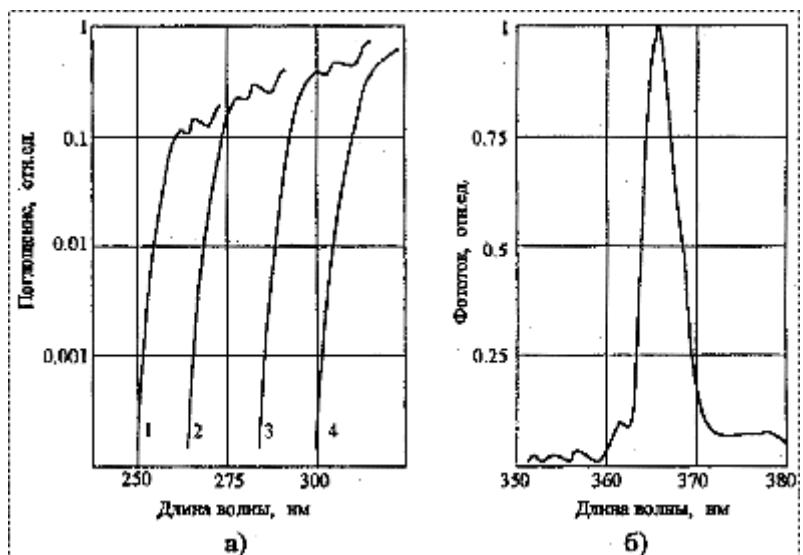


Рис. 4. Спектральные характеристики коэффициентов пропускания для твердого раствора $Al_xGa_{1-x}N$ в зависимости от состава: 1) $x = 0,61$, 2) $x = 0,55$, 3) $x = 0,46$, 4) $x = 0$ (а) и фототока фоторезистора на основе GaN (б)

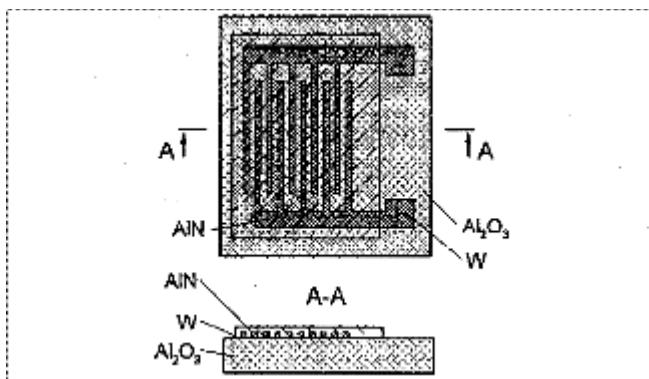


Рис. 5. Конструкция УФ датчика на основе композиции AlN-Al₂O₃

датчика "жесткого" УФ излучения на основе композиции AlN-Al₂O₃, который обеспечивает высокую чувствительность в диапазоне 180-280 нм и имеет максимум спектральной чувствительности на длине волны 217 нм. Основные характеристики прибора представлены ниже.

Спектральный диапазон, нм	180-280
Максимальная спектральная чувствительность, нм	217
$U_{раб}$, В	12 (1000)
$I_{темн}$, А	10^{-9}
$I_{раб}$, А	$10^{-6} - 10^{-5}$
$R_{темн}/R_{раб}$ (в озоновой "дыре")	$10^3 - 10^4$ (~100)
Размер чувствительной области, мм	3×3
Чувствительность, А/Вт	0,015
Быстродействие (RC), с	0,5

Структуры на основе AlN выгодно отличаются положением спектра чувствительности в области "жесткого" ультрафиолета (см. рис. 1), стабильностью параметров, а также возможностью работы прибора при высоких температурах и повышенных уровнях радиации.

Фоторезисторы на алмазе, который обладает уникальным сочетанием ценных свойств (большая ширина запрещенной зоны, высокая теплопроводность, химическая и радиационная стойкость и др.), чрезвычайно перспективны для регистрации "жесткого" УФ. К настоящему времени фото проводимость природ-

ных и синтетических монокристаллов алмаза изучена достаточно подробно [10]. Опубликованы также данные по фотопроводимости пленок алмаза, выращенных из газовой фазы (наиболее распространенный метод синтеза искусственных слоев алмаза) (рис. 7) [11].

На основе поликристаллических пленок алмаза были созданы фоторезистивные датчики УФ излучения. Полученные экспериментальные данные позволяют заключить, что поликристаллические пленки газофазного алмаза обладают фотопроводимостью в УФ диапазоне, большей чем фотопроводимость некоторых природных монокристаллов алмаза [11].

В плане практической реализации были изготовлены опытные образцы УФ фоторезисторов на природном алмазе со следующими параметрами:

Спектральный диапазон, нм.....	205-280
Ширина пика, нм.....	0,015
Чувствительность, А/Вт.....	0,5
Темновое сопротивление, ГОм	0,015

Фотодиоды. Фотодиоды, чувствительные в УФ области, представлены структурами на основе $p-n$ -переходов (рис. 8, а), $p-i-n$ -структур (рис. 8, б), а также на основе барьера Шоттки (рис. 8, в).

У фотодиодов на основе $p-n$ -перехода имеется много преимуществ, главным из которых является малая инерционность.

Спектральная характеристика фотодиода подобна аналогичной характеристике фоторезистора. Длинноволновая граница чувствительности определяется значением ширины запрещенной зоны, а спад в коротковолновой области спектра объясняется тем, что коэффициент поглощения растет и большая часть излучения поглощается в приповерхностном слое базы, где время жизни неосновных носителей заряда мало и меньшая часть генерированных светом носителей доходит до электронно-дырочного перехода. Следовательно, положение коротковолновой границы фоточувствительности зависит от ширины базы и скорости поверхности рекомбинации.

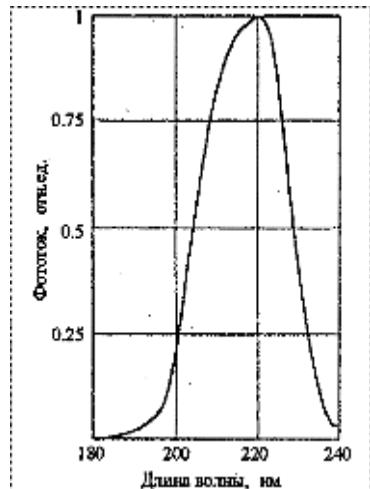


Рис. 7. Спектральная характеристика чувствительного элемента датчика УФ излучения на основе алмаза

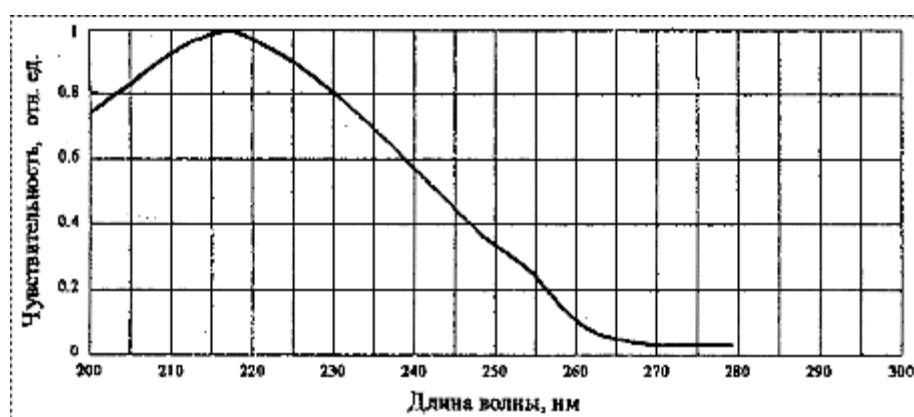


Рис. 6. Спектральная чувствительность датчика на основе композиции AlN-Al₂O₃

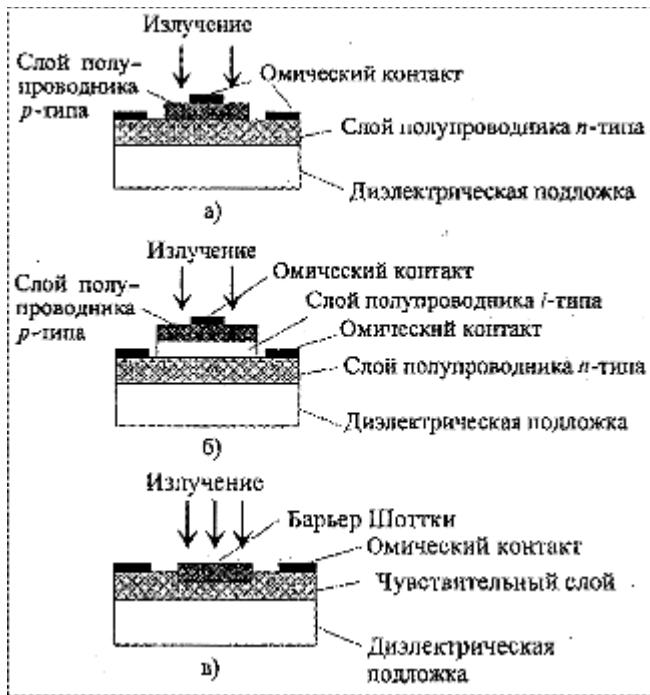


Рис. 8. Фотодиодные структуры на основе: $p-n$ -переходов (а), $p-i-n$ -структур (б), барьеров Шоттки (в)

Линейная зависимость фототока от интенсивности света является большим преимуществом фотодиодов перед фоторезисторами. Темновое сопротивление фотодиода может быть много больше, чем у фоторезистора, поскольку оно определяется обратным током электронно-дырочного перехода, который имеет небольшое значение. Соответственно отношение темнового сопротивления к сопротивлению при освещении у фотодиода также выше.

температуры определяется главным образом температурной зависимостью коэффициента собирания. Влияние оказывают температурные изменения коэффициента поглощения света, ширины запрещенной зоны полупроводника, диффузионной длины неосновных носителей.

Фотодиоды являются более быстродействующими фотоприемниками, чем фоторезисторы и применяются для регистрации излучения, модулированного по интенсивности. Высокое быстродействие может быть получено в $p-i-n$ -структуре (см. рис. 8, б), если поглощение света происходит в высокомомбной области, а также в фотодиодах на основе барьера Шоттки (см. рис. 8, в).

Фотоприемники на основе GaP представляют большой интерес для тех областей применения, когда требуется селективное детектирование УФ излучения. Собственное поглощение GaP начинается с 2,27 эВ, но из-за реализации непрямых переходов при этой энергии квантов оно мало и остается таковым вплоть до энергий ~2,7 эВ. Сильное поглощение начинается лишь при энергии квантов больше 2,27 эВ.

Одним из типов УФ фотоприемников на основе GaP являются приборы, созданные с использованием поверхностно-барьерных структур металл - фосфид галлия. В качестве исходного материала используются как объемные монокристаллы, так и эпитаксиальные слои. В качестве металла для полупрозрачного барьера-ного контакта наиболее часто используют Au и Ni (10...20 нм). Такие поверхностно-барьерные структуры обладают свойствами, близкими к идеальной модели контакта металл-полупроводник.

Фотодиоды с барьером Шоттки на основе GaP чувствительны в диапазоне 200...500 нм, имеют максимум фоточувствительности при $\lambda=0,43$ мкм и обладают токовой чувствительностью примерно 0,22 А/Вт

(рис. 9, а). Линейная зависимость фототока от падающего излучения сохраняется в достаточно широком диапазоне. С повышением температуры фоточувствительность слабо изменяется. Напряжение пробоя фотодиодов при $T=300$ К составляет 5-15 В. Использование серебра в качестве материала контакта позволяет создать селективный фотоприемник (рис. 9, б), где серебро выполняет функцию контакта и светофильтра одновременно [12].

Фотоприемники на основе SiC обладают повышенной температурой и радиационной устойчивостью. Карбид кремния - широкозонный полупроводник. Значение его ширины запрещенной зоны меняется от 2,39 эВ (3C-SiC) до 3,32 эВ (2H-SiC). На основе карбида кремния можно создавать как УФ фоторезисторы, так и фотодиоды с барьером Шоттки и с $p-n$ -переходом. Наиболее известными фотоприемниками УФ диапазона на SiC являются фотодиоды с барьером Шоттки (рис. 10) со следующими типичными параметрами [13-15]:

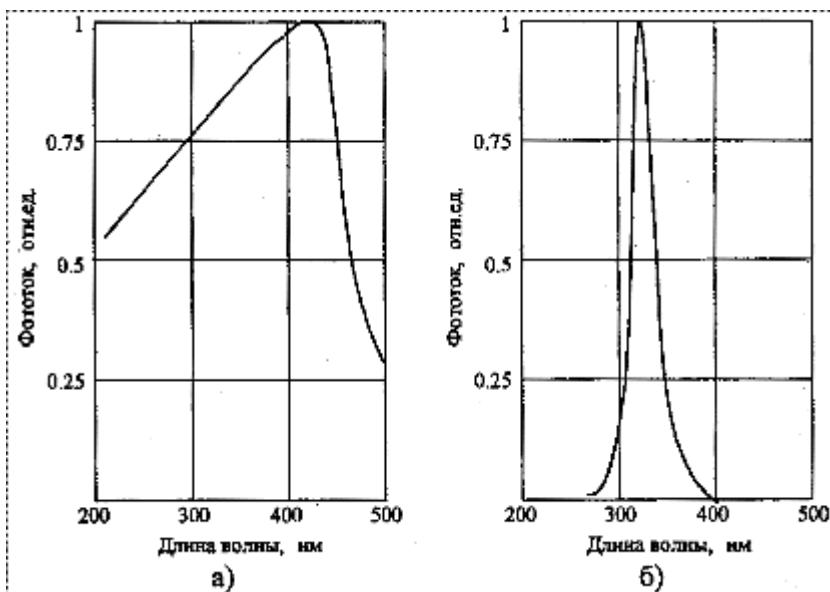


Рис. 9. Спектральные характеристики фотоприемников на основе барьера Шоттки к GaP:
а – широкополосного; б – селективного

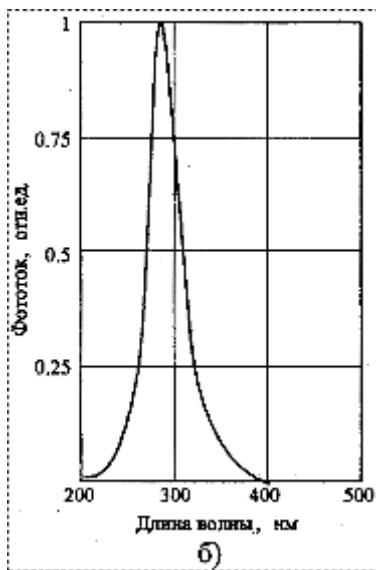


Рис. 10. Конструкция (а) и спектральная характеристика (б) фотоприемника на основе барьера Шоттки к SiC

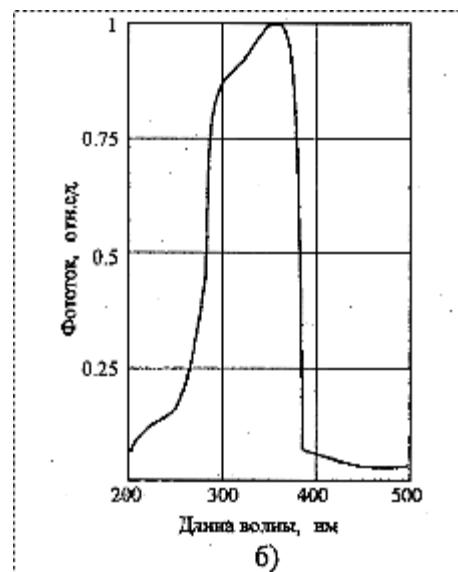
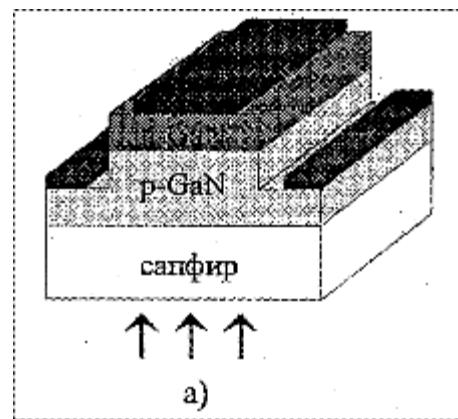
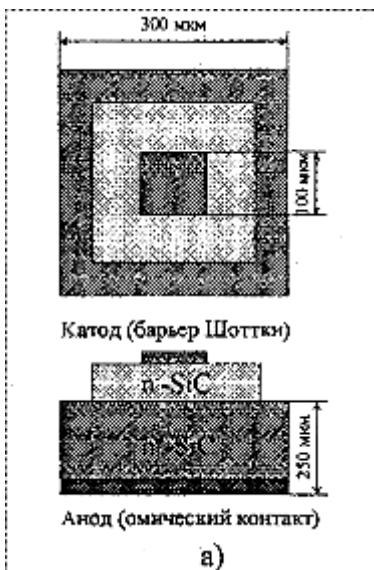
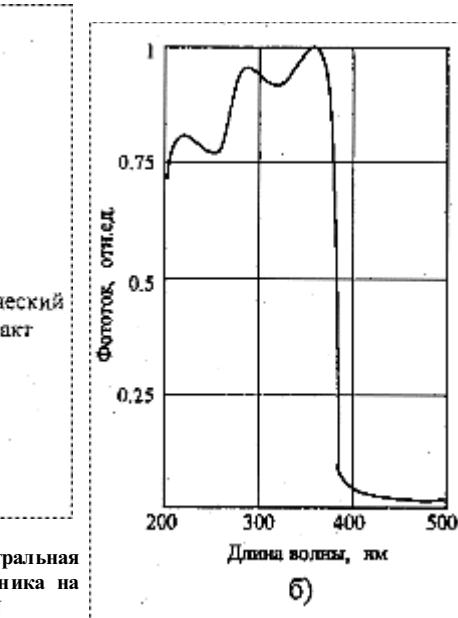


Рис. 11. Конструкция (а) и спектральная характеристика (б) фотоприемника на основе GaN *p-n*-перехода



Напряжение питания, В	1
Сила темнового тока, фА	0,2
Сила фототока, нА	20-
50	
Чувствительность, мА/Вт	145

Фотодиоды на основе нитрида галлия, нитрида алюминия и твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ являются наиболее перспективными чувствительными элементами в УФ области. На основе композиции $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ созданы все вышеперечисленные диодные структуры (рис. 11-13) [16, 17].

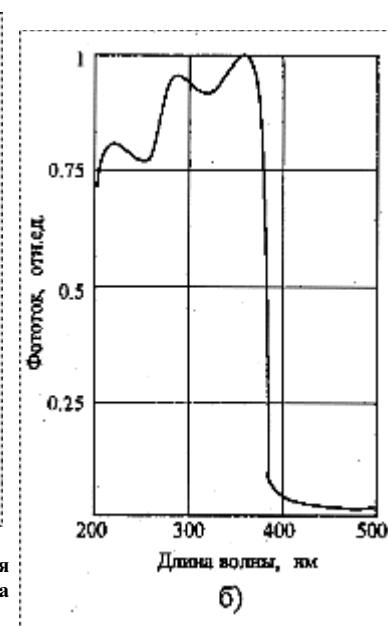
Фототранзисторы. Для регистрации УФ излучения используются полевые фототранзисторы, в основе функционирования которых лежит изменение концентрации носителей заряда в канале, а следовательно, его проводимости за счет освещенности. Базовые конструкции полевых фототранзисторов на основе барьера Шоттки и МДП-структур представлена на рис. 14.

Достоинством полевого фототранзистора является высокое выходное сопротивление, вследствие чего могут быть обеспечены хорошие пороговые характеристики. Особенностью полевого фототранзистора является также низкая инерционность вследствие отсутствия инжекции и диффузионной емкости на входе. К другим особенностям фотоприемников с усилением (по сравнению с фотодиодами) можно отнести более низкую температурную и временную стабильность характеристик, более высокий уровень шума, сужение диапазона линейности выходной характеристики. Эти недостатки удается в некоторых случаях преодолеть, разделяя на монокристалле фоточувствительный и усилительный элементы.

Фототранзисторы на основе МДП структур (рис. 14,6) отличаются высоким быстродействием, малыми шумами, высоким входным



Рис. 12. Конструкция (а) и спектральная характеристика (б) фотоприемника на основе барьера Шоттки к *p*-GaN



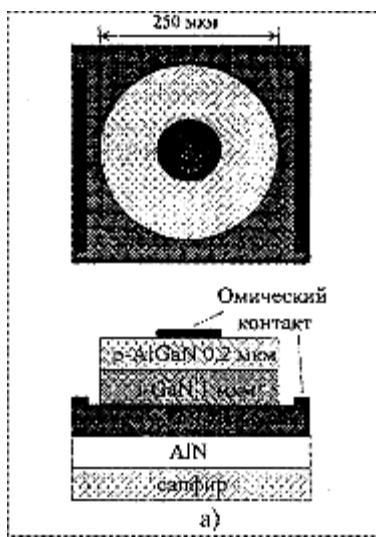


Рис. 13. Конструкция (а) и спектральная характеристика (б) фотоприемника на основе p - i - n -перехода в твердом растворе AlGaN

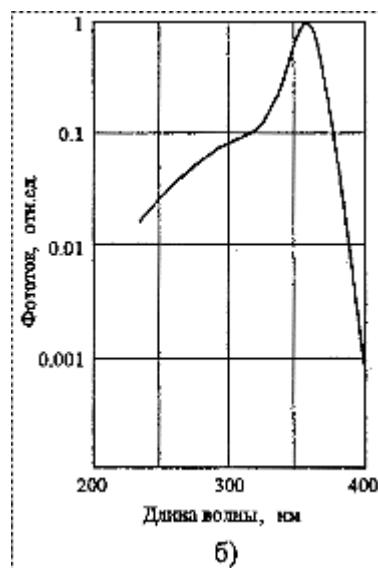


Рис. 14. Структуры чувствительных элементов на основе полевого транзистора с барьером Шоттки (а) и МДП транзистора (б)

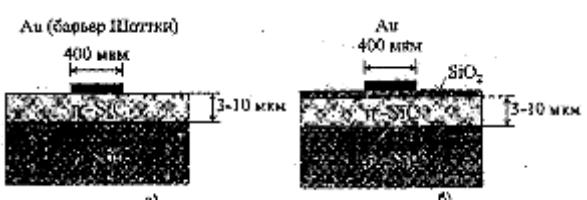


Рис. 15. Структуры полевых карбидокремниевых фототранзисторов: МДП (а) и барьер Шоттки (б) и характеристики (в) и (г) – темновые, (д) и (е) при освещении ртутной лампой

сопротивлением. Для них характерны достаточно низкий порог фоточувствительности в режиме нестационарного обеднения, возможность управления фоточувствительностью внешним электрическим полем, а также высокая радиационная стойкость.

Фототранзисторы на основе барьера Шоттки обладают высокой фоточувствительностью, обеспечивающей еще более высокое быстродействие по сравнению с фототранзисторами на основе МДП-структур.

В литературе имеются данные по полевым транзисторам, чувствительным в УФ области спектра, на основе карбида кремния (рис 15) [18] и композиций нитрида галлия - твердые растворы $Al_xGa_{1-x}N$ (рис. 16).

Представленный обзор в области твердотельных датчиков "жесткого" УФ излучения показывает, что, к сожалению, имеющиеся в литературе данные по параметрам созданных приборов весьма скучны. Фактически отсутствуют такие характеристики, как чувствительность фотоприемных элементов, их инерционность, зависимость параметров от температуры, а также устойчивость к воздействию радиации. В настоящее время в Центре микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета совместно с

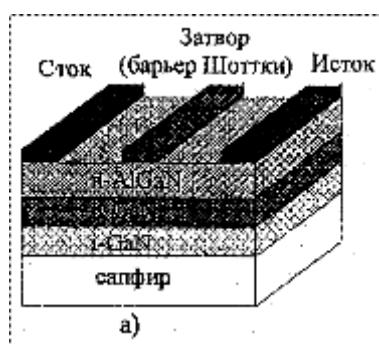
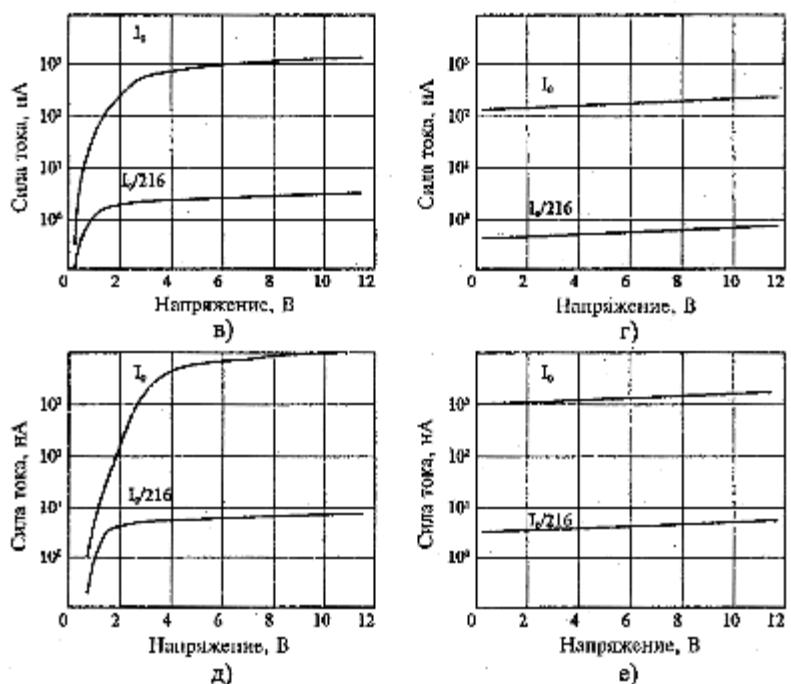
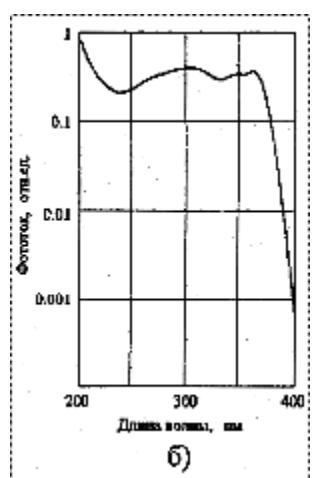


Рис. 16. Структура (а) и спектральная характеристика выходного тока (б) полевого транзистора с барьером Шоттки на основе композиции AlGaN/GaN



ЭНПО "Специализированные электронные системы" проводится комплекс работ по исследованию устойчивости УФ фотоприемных устройств на основе нитрида алюминия и карбида кремния к воздействию экстремальных факторов (высокие температуры - более 400 °C и уровень радиации - флюенс нейтронов более 1015 нейтрон/см²). Полученные предварительные результаты позволяют прогнозировать возможность эксплуатации приборов в условиях специальных воздействий.

Перспективность широкозонных материалов GaN, AlN, SiC и композиций на их основе для датчиков "жесткого" ультрафиолета безусловно определяется также совместимостью материалов и технологий при создании УФ оптопар "излучающий - фотоприемный элемент".

Список литературы

1. Edmold, G. Bulman, H.S. Kong, M. Leonardo, K. Doverspike, W. Weeks, J. Niccum, S.T. Sheppard, G. Negley, D. Slater, J.D. Brown, J.T. Swindell, T. Overocker, J.F. Schetzina, Y.-K. Song, M. Kiihal and A. Nunninkko. Nitride-Based Emitters on SiC Substrates // Materials Science Forum. Vols. 264-268(1998) 1998. P. 1421-1424. TransTech Publications, Switzerland.
2. Beaumont, F. Calle, S. Haffouz, E. Monroy, M. Leroux, E. Calleja, P. Lorenzini, E. Munoz and P. Gibart // Blue-U.V. Homojunction GaN LEDs Fabricated by MOVPE. Materials Science Forum. Vols. 264 -268 (1998) pp. 1425-1428, 1998, Trans Tech Publications. Switzerland.
3. Nagatomo and H. Saitou. Electroluminescence of GaN pn Diodes // Materials Science Forum. Vols. 264-268 (1998). Trans Tech Publications, Switzerland. 1998.
4. Calcagnile, G. Coli, R. Rinaldi, R. Cingolani, H. Tang, A.E. Botchkarev, V.V. Kini, A. Salvador and H. Morko. Ultraviolet Stimulated Emission in GaN/AlGaN Multiple Quantum Wells // Materials Science Forum. Vols. 264-268 (1998). pp. 1433-1436. 1998. Trans Tech Publications, Switzerland.
5. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / И.Д. Анисимова, И.М. Викулин, Ф.А. Зайтов, Ш.Д. Курмашев; Под ред. В.И. Стafeева. М.: Радио и связь, 1984. 216с.
6. Ferguson, S. Liang, C.A. Tran, R.F. Karlicek, Z.C. Feng, Y. Lu and C. Joseph. An Investigation of Breakdown Mechanisms in Al(GaN) MSM Photodetectors // Materials Science Forum. Vols. 264-268 (1998). P. 1437-1440, 1998, Trans Tech Publications, Switzerland.
7. Положительное решение от 31.03.99 по заявке № 99105813/28(006554) от 03.03.98. Лучинин В.В., Корляков А.В., Костромин С.В., Четвергов М.В., Сазанов А.П. "Полупроводниковый датчик ультрафиолетового излучения".
8. Kazak-Kazakevich, A.V. Korlyakov, S.V. Kostromin. V.V. Luchinin. Ion-chemical epitaxy of SiC-AlN composition, E-MRS. France, Strasbourg, Spring Meeting, 1996. pp. A-26.
9. Luchinin V.V., Chetvergov M.V., Korlyakov A.V., Kostromin S.V., Sazanov A.P., Popov V.A. AlN/Al203 Composition Based Hard Ultravi olet Radiations Sensor. EUROSENSORS XIII. The 13 th European Conference on Solid-State Transducers, September 12-15,1999. The Hague, The Netherlands. P. 505-508.
10. Хитковский В.Д., Алтухов А.А., Камальдилов В.А., Татьяниня Н.А., Гладков П.В. Использование природного алмазного сырья для изготовления перспективных полупроводниковых приборов // Материалы IV Межрегионального симпозиума "Тонкие пленки в электронике", Москва - Улан-Удэ, 1993.
11. Grornov D.V., Kvaskov V.B., Maltsev P.P., Nikiforov A.Y., Telets V.A. Ultraviolet Sensors Based on the Natural Diamond // EurosensorsX, Lenven, Belgium, 8-11 September, 1996.
12. Орлова Т.А. Исследование контактов металл-фосфид галлия и разработка УФ фотоприемников на их основе / Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук, Санкт-Петербург -1999.
13. Edmond, H.S. Kong, and C.H. Carter, Jr., High Temperature Rectifiers, UV Photodiodes, and Blue LEDs in 6H-SiC. Proc. 4th Intl. Conf. Amorph. & Crystal SiC & Other IV-IV Materials Santa Clara, CA. P. 344-351 (October 1991).
14. Brown, E.T. Downey, M. Ghezzo, J.W. Kretchmer, R. J. Saia, Y.S. Liu, J.A. Edmond, G. Gati, J.M. Pimbley and W.E. Schneider. Silicon Carbide UV Photodiodes. IEEE Trans. on Electron Devices. 1993. Vol. 40, N. 2. P. 325-333.
15. Verenichikova and V.I. Sankin. Ultraviolet Photodetector Using a Cr-SiC Surface-Barrier Diode. Sov. Tech. Phvs. Lett. October 1988. Vol. 14, N. 10, P.756-758.
16. Xu, A. Salvador, A.E. Botchkarev, W. Kirn, C. Lu, H. Tang, H. Morko, G. Smith, M. Estes, T. Dang and P. Wol. High Speed, Low Noise Ultraviolet Photodetectors Based on GaN p-i-n and AlGaN(p)-GaN(i)-GaN(n) Structures // Materials Science Forum. 1998. Vols. 264 -268. P. 1441-1444, 1998, TransTech Publications, Switzerland.
17. Kuek, M.A. Wong, T.A. Fisher, B.D. Nener, E.E. Dept and D.L. Pulfrey. Modelling AlGaN/GaN UV photodetectors.
18. Grekhov, P.A. Ivanov, T.P. Samsonova, A.F. Shulekin and M.I. Vexler. SiC-Based Phototransistor with a Tunnel MOS Emitter // IEEE Transactions on Electron Devices. March 1999. Vol. 46, N. 3.

УДК 681.846.3

И.В. Власов, канд. Техн. наук, С.Г. Семенцов

Ю.А. Поляков,

МГТУ им. Н.Э. Баумана

<http://iu4.bmstu.ru>, <http://activ.iu4.bmstu.ru>

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ МИКРОСИСТЕМЫ АКТИВНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Рассмотрены вопросы теории и практики проектирования систем активной индивидуальной защиты от акустических воздействий (активных научников). Проанализированы состав и структура информационного, программного и аппаратного обеспечения этих систем. Исследованы вопросы применения микроминиатюрных регистрирующих датчиков и компенсирующих излучателей. Дан краткий обзор имеющихся на рынке активных научников.

Введение

Развитие техники и технологии помимо очевидных плюсов несет и значительное усиление психологического давления на человека. Информационные потоки, шумовые поля действуют угнетающе на человеческую психику и вызывают быструю утомляемость и раздражительность. Особенно неблагоприятно это воздействие проявляется в низкочастотной части спектра, где сосредоточена основная энергия излучения большинства источников звука и где обычные средства звукоизоляции малоэффективны. Разнообразные поглотители, демпферы, звукоизоляторы, называемые пассивными средствами защиты [1, 2], обладают эффективным поглощением только при линейных размерах, сравнимых с длиной волны излучения. Альтернативой пассивным методам защиты являются системы *активного гашения* (САГ) [1,2], в которых гашение шумового поля достигается наложением на исходное поле другого поля, инверсного по отношению к гасимому.

ЭНПО "Специализированные электронные системы" проводится комплекс работ по исследованию устойчивости УФ фотоприемных устройств на основе нитрида алюминия и карбida кремния к воздействию экстремальных факторов (высокие температуры - более 400 °C и уровень радиации - флюенс нейтронов более 1015 нейтрон/см²). Полученные предварительные результаты позволяют прогнозировать возможность эксплуатации приборов в условиях специальных воздействий.

Перспективность широкозонных материалов GaN, AlN, SiC и композиций на их основе для датчиков "жесткого" ультрафиолета безусловно определяется также совместимостью материалов и технологий при создании УФ оптопар "излучающий - фотоприемный элемент".

Список литературы

1. Edmold, G. Bulman, H.S. Kong, M. Leonardo, K. Doverspike, W. Weeks, J. Niccum, S.T. Sheppard, G. Negley, D. Slater, J.D. Brown, J.T. Swindell, T. Overocker, J.F. Schetzina, Y.-K. Song, M. Kiihal and A. Nunninkko. Nitride-Based Emitters on SiC Substrates // Materials Science Forum. Vols. 264-268(1998) 1998. P. 1421-1424. TransTech Publications, Switzerland.
2. Beaumont, F. Calle, S. Haffouz, E. Monroy, M. Leroux, E. Calleja, P. Lorenzini, E. Munoz and P. Gibart // Blue-U.V. Homojunction GaN LEDs Fabricated by MOVPE. Materials Science Forum. Vols. 264 -268 (1998) pp. 1425-1428, 1998, Trans Tech Publications. Switzerland.
3. Nagatomo and H. Saitou. Electroluminescence of GaN pn Diodes // Materials Science Forum. Vols. 264-268 (1998). Trans Tech Publications, Switzerland. 1998.
4. Calcagnile, G. Coli, R. Rinaldi, R. Cingolani, H. Tang, A.E. Botchkarev, V.V. Kini, A. Salvador and H. Morko. Ultraviolet Stimulated Emission in GaN/AlGaN Multiple Quantum Wells // Materials Science Forum. Vols. 264-268 (1998). pp. 1433-1436. 1998. Trans Tech Publications, Switzerland.
5. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / И.Д. Анисимова, И.М. Викулин, Ф.А. Зайтов, Ш.Д. Курмашев; Под ред. В.И. Стafeева. М.: Радио и связь, 1984. 216с.
6. Ferguson, S. Liang, C.A. Tran, R.F. Karlicek, Z.C. Feng, Y. Lu and C. Joseph. An Investigation of Breakdown Mechanisms in Al(GaN) MSM Photodetectors // Materials Science Forum. Vols. 264-268 (1998). P. 1437-1440, 1998, Trans Tech Publications, Switzerland.
7. Положительное решение от 31.03.99 по заявке № 99105813/28(006554) от 03.03.98. Лучинин В.В., Корляков А.В., Костромин С.В., Четвергов М.В., Сазанов А.П. "Полупроводниковый датчик ультрафиолетового излучения".
8. Kazak-Kazakevich, A.V. Korlyakov, S.V. Kostromin. V.V. Luchinin. Ion-chemical epitaxy of SiC-AlN composition, E-MRS. France, Strasbourg, Spring Meeting, 1996. pp. A-26.
9. Luchinin V.V., Chetvergov M.V., Korlyakov A.V., Kostromin S.V., Sazanov A.P., Popov V.A. AlN/Al203 Composition Based Hard Ultravi olet Radiations Sensor. EUROSENSORS XIII. The 13 th European Conference on Solid-State Transducers, September 12-15,1999. The Hague, The Neth erlands. P. 505-508.
10. Хитковский В.Д., Алтухов А.А., Камальдинов В.А., Татьяниня Н.А., Гладков П.В. Использование природного алмазного сырья для изготовления перспективных полупроводниковых приборов // Материалы IV Межрегионального симпозиума "Тонкие пленки в электронике", Москва - Улан-Удэ, 1993.
11. Grornov D.V., Kvaskov V.B., Maltsev P.P., Nikiforov A.Y., Telets V.A. Ultraviolet Sensors Based on the Natural Diamond // EurosensorsX, Lenven, Belgium, 8-11 September, 1996.
12. Орлова Т.А. Исследование контактов металл-фосфид галлия и разработка УФ фотоприемников на их основе / Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук, Санкт-Петербург -1999.
13. Edmond, H.S. Kong, and C.H. Carter, Jr., High Temperature Rectifiers, UV Photodiodes, and Blue LEDs in 6H-SiC. Proc. 4th Intl. Conf. Amorph. & Crystal SiC & Other IV-IV Materials Santa Clara, CA. P. 344-351 (October 1991).
14. Brown, E.T. Downey, M. Ghezzo, J.W. Kretchmer, R. J. Saia, Y.S. Liu, J.A. Edmond, G. Gati, J.M. Pimbley and W.E. Schneider. Silicon Carbide UV Photodiodes. IEEE Trans. on Electron Devices. 1993. Vol. 40, N. 2. P. 325-333.
15. Verenichikova and V.I. Sankin. Ultraviolet Photodetector Using a Cr-SiC Surface-Barrier Diode. Sov. Tech. Phvs. Lett. October 1988. Vol. 14, N. 10, P.756-758.
16. Xu, A. Salvador, A.E. Botchkarev, W. Kirn, C. Lu, H. Tang, H. Morko, G. Smith, M. Estes, T. Dang and P. Wol. High Speed, Low Noise Ultraviolet Photodetectors Based on GaN p-i-n and AlGaN(p)-GaN(i)-GaN(n) Structures // Materials Science Forum. 1998. Vols. 264 -268. P. 1441-1444, 1998, TransTech Publications, Switzerland.
17. Kuek, M.A. Wong, T.A. Fisher, B.D. Nener, E.E. Dept and D.L. Pulfrey. Modelling AlGaN/GaN UV photodetectors.
18. Grekhov, P.A. Ivanov, T.P. Samsonova, A.F. Shulekin and M.I. Vexler. SiC-Based Phototransistor with a Tunnel MOS Emitter // IEEE Transactions on Electron Devices. March 1999. Vol. 46, N. 3.

УДК 681.846.3

И.В. Власов, канд. Техн. наук, С.Г. Семенцов

Ю.А. Поляков,

МГТУ им. Н.Э. Баумана

<http://iu4.bmstu.ru>, <http://activ.iu4.bmstu.ru>

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ МИКРОСИСТЕМЫ АКТИВНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Рассмотрены вопросы теории и практики проектирования систем активной индивидуальной защиты от акустических воздействий (активных научников). Проанализированы состав и структура информационного, программного и аппаратного обеспечения этих систем. Исследованы вопросы применения микроминиатюрных регистрирующих датчиков и компенсирующих излучателей. Дан краткий обзор имеющихся на рынке активных научников.

Введение

Развитие техники и технологии помимо очевидных плюсов несет и значительное усиление психологического давления на человека. Информационные потоки, шумовые поля действуют угнетающе на человеческую психику и вызывают быструю утомляемость и раздражительность. Особенно неблагоприятно это воздействие проявляется в низкочастотной части спектра, где сосредоточена основная энергия излучения большинства источников звука и где обычные средства звукоизоляции малоэффективны. Разнообразные поглотители, демпферы, звукоизоляторы, называемые пассивными средствами защиты [1, 2], обладают эффективным поглощением только при линейных размерах, сравнимых с длиной волны излучения. Альтернативой пассивным методам защиты являются системы *активного гашения* (САГ) [1,2], в которых гашение шумового поля достигается наложением на исходное поле другого поля, инверсного по отношению к гасимому.

Первые разработки САГ относятся к началу 30-х годов. В 1934 г. была запатентована САГ шума, состоявшая из микрофона, блока управления (включающего в себя усилитель, линии задержки и фильтры) и излучателя. Несмотря на кажущуюся простоту метода его строгое теоретическое обоснование не рассматривалось вплоть до начала 60-х годов. Большинство авторов ограничивались качественным описанием методов и средств гашения звуковых полей. В этот период были опубликованы работы Г. Олсона и Е. Мэя [3], посвященные локальному подавлению шума в случае индивидуальной защиты, в России основные физико-математические методы по реализации данных систем были заложены в работах ГНЦ РФ "Акустический институт им. академика Н.Н. Андреева" (<http://www.akin.ru>). При построении систем активной индивидуальной защиты, как правило, используются облегченные конструкции головных телефонов с установленными в них элементами САГ, например, для обслуживающего персонала палубной авиации [3].

Практическое применение микропроцессорных систем индивидуальной акустозащиты началось только в последнее десятилетие, когда уменьшение себестоимости и рост производительности микропроцессорных комплектов, чаще всего на основе цифровых сигнальных процессоров (DSP), позволили разрабатывать и выпускать средства индивидуальной акустозащиты, ориентированные не только на профессионалов, но и на массового потребителя.

Применение для индивидуальной защиты систем активного гашения весьма перспективно. Поскольку в подавляющем большинстве случаев воспринимаемая слухом звуковая волна является плоской, то для ее корректной регистрации достаточно одного-двух датчиков. Высокое качество излучателей современных головных телефонов позволяет получить практически плоскую АЧХ в диапазоне 16-20 000 Гц, низкие переходные и фазовые искажения. В результате средства индивидуальной активной акустозащиты позволяют подавить внешнее шумовое поле на 15 - 20 дБ в диапазоне частот 16-500 Гц. Ослабление более высокочастотных полей может осуществляться звукопоглощающими материалами амбушюров головных телефонов.

Средства индивидуальной активной акустозащиты применяются уже достаточно широко на производстве, транспорте и в системах связи. В последние годы в связи со значительным снижением себестоимости эти системы проникли и в бытовую сферу и используются с самой различной звуковоспроизводящей аппаратурой в условиях повышенного шума.

Физиологические характеристики человека как объекта защиты

Слуховое восприятие обеспечивает человеку прием звуковых колебаний от источника звука. Слух среднестатистического человека способен воспринимать звуковые колебания в частотном диапазоне от 16 до 20 000 Гц (звуки с частотой ниже 16 Гц относятся к инфразвуку, а с частотами выше 20 000 Гц - к ультразвуку).

Степень восприятия звука ухом человека зависит от уровня громкости и условий восприятия. Громкость - субъективный аналог интенсивности звука, оцениваемой в единицах звуковой энергии (Вт/см²) или в относительных единицах - децибелах (дБ). Минимальное звуковое давление, необходимое для того, чтобы звук был слышен, называют порогом слышимости. Более интенсивные звуковые воздействия ведут к болевым ощущениям и могут привести даже к повреждению органов слуха.

В таблице представлена субъективная оценка действия звука различной интенсивности на человека [1].

Таблица
Усредненная оценка действия шума на человека-оператора

Субъективная оценка	Звуковое давление, дБ	Сила звука, Вт/см ²
Порог слышимости	0	10^{-16}
Шум заметен	До 80	10^{-8}
Шум беспокоит	90	10^{-7}
Шум мешает	100	10^{-6}
Разговор невозможен	110	10^{-5}
Шум подавляет и раздражает	120	10^{-4}
Болевые ощущения	130	10^{-3}

График зависимости громкости звука от частоты представлен на рис. 1 (однако интенсивность звука в данном случае является функцией частоты только до уровня 90 дБ). Для больших уровней громкости эта зависимость исчезает.

Кроме приведенных выше параметров звуковые колебания оцениваются длительностью, которая выражается в секундах.

Как правило, источником звуковой энергии являются поверхности конструкций, совершающие колебания, которые и создают акустическое поле шумящего объекта. Образующееся акустическое поле характери-

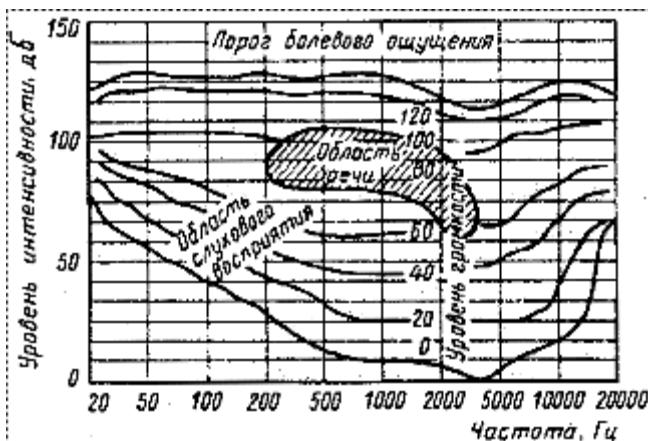
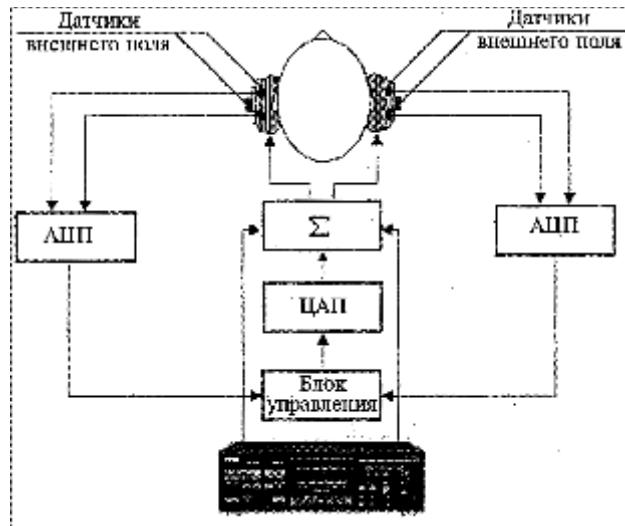


Рис. 1. Зависимость громкости звука от частоты



Алгоритм работы при определении характеристик фильтров блока управления при известных и неизменных характеристиках внешнего шумового поля:

```

void Interrup(n, kadr) // Инициализируем обработчик прерываний (кадровый ввод сигналов)
// n-номер итерации, kadr-размерность кадра (число вводимых отсчетов на одной итерации)
// Вводим массивы x[n][i], e[n], где i-текущий разряд фильтра, max[i]=N
for(i=0,i<N,i++){
for(j=0,j<N,j++){g[n, j]=x[n, j]-q[n-1, j];} // Учитываем влияние обратной связи
m[0]=c2[0]*g[n, 0]; // c2[N]-известная характеристика участка от излучателя до измерителя
for(j=1,j<N,j++){m[n, j]=m[j-1]+c2[j]*g[n-i, j];} // Учитываем влияние участка от излучателя до измерителя
for(j=0,j<N,j++){h[n, j]=h[n-1, j]-alpha*m[n, j]*e[n];} // Находим вектор весовых коэф. Для основной настройки
y[n, 0]=h[n, 0]*g[n, 0]; // Находим вектор сигнала компенсации
for(j=1,j<N,j++){y[n, j]=y[n, j-1]+h[n, j]*g[n-i, j];}
q[n, 0]=c1[0]*y[n, 0]; // c1[N]-известная характеристика участка волновой обратной связи (ВОС)
for(j=1,j<N,j++){q[n, j]=q[n, j-1]+c1[j]*y[n-i, j];} // Учитываем влияние участка ВОС
// выводим на ЦАП значение массива y[n, N]}
// Ждем следующего запроса на инициализации обработчика прерывания

```

Рис. 2. Структурная схема модели неадаптивной системы индивидуальной акустозащиты

зуется звуковым давлением P и колебательной скоростью U , возникающими в точке воздушной среды при прохождении через нее звуковой волны.

Энергетическими характеристиками акустического поля являются:

- интенсивность J , т.е. количество энергии упругих волн, проходящих за единицу времени через единицу поверхности в направлении нормали;
- мощность излучения N , т.е. количество энергии, проходящей (уходящей на бесконечность) за единицу времени через замкнутую поверхность, огибающую источник звука;
- плотность энергии звуковых волн W - количество энергии, содержащейся в единице объема среды.

Важную роль при расчете акустического поля механизма имеет характеристика направленности звукоизлучения источника, т.е. угловое пространственное распределение образующегося вокруг него звукового давления.

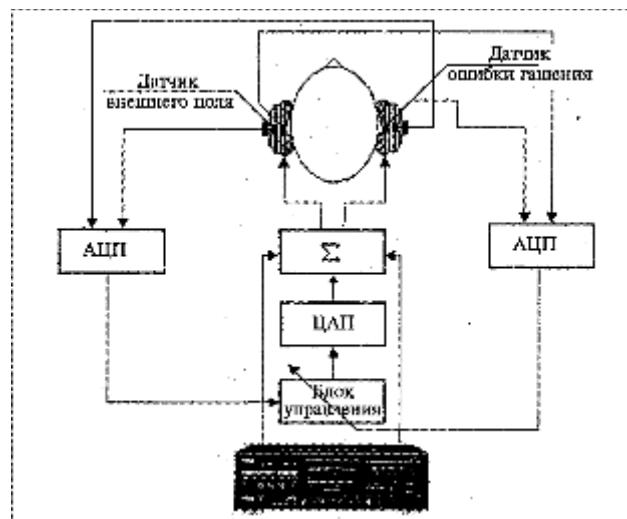
Структурные схемы и алгоритмы систем активной индивидуальной защиты

Согласно классификации САГ, приведенной в [1, 2], для решения задач индивидуальной защиты могут, в

общем случае, использоваться как неадаптивные, так и адаптивные САГ.

При проектировании неадаптивных САГ значения импульсной характеристики фильтров блока управления, полученные на этапе идентификации внешнего шумового поля, зафиксированы на конкретном значении, обеспечивающем наилучшее качество гашения для наиболее вероятных условий работы. Однако при изменении этих условий ожидаемого качества гашения можно не получить. Структурная схема данных систем на базе ADSP2181 фирмы Analog Devices и листинг кода программы на C++ представлены на рис. 2.

Рассмотрим работу неадаптивной САГ более подробно. Информация о внешнем шумовом поле, воспринятая системой датчиков (микрофонов), после оцифровки поступает в блок управления. Здесь методами цифровой обработки генерируется сигнал, идентичный по спектру исходному, но находящийся к нему в противофазе. Блок управления может быть реализован разнообразными методами: от программируемой логики до нейросетей, но наиболее перспективным представляется применение специально разработанных для целей обработки в режиме реального времени



Алгоритм работы центрального УНМБУ при адаптивной настройке всех узлов настройки блока управления:

```

.....
void Interrup(n, kadr) // Инициализируем обработчик прерываний (кадровый ввод сигналов)
{// n-номер итерации, kadr-размерность кадра (число вводимых отсчетов на одной итерации)
// Вводим массивы x[n,i],e[n], где i-текущий разряд фильтра, max[i]=N
for(j=1,j<N,j++) {g[n, j]=x[n,i]-q[n-1,i];}
e1[n]=e[n]-v[n-1];
for(j=0,j<N,j++) {c2[n,j]=c2[n-1,j]-gamma*y[n,j]*e1[n];}
m[0]=c2[0]*g[n,0];           // c2[N]-известная характеристика участка от излучателя до измерителя
for(j=1,j<N,j++) {m[n,j]=m[j-1]+c2[n,j]*g[n-i,j];} // Учитываем влияние участка от излучателя до измерителя
for(j=0,j<N,j++) {h[n,j]=h[n-1,j]-alpha*m[n,j]*e[n];} // Находим вектор весовых коэф. ЦУН
y[n,0]=h[n,0]*g[n,0];          // Находим вектор сигнала компенсации
for(j=1,j<N,j++) {y[n,j]=y[n,j-1]+h[n,j]*g[n-i,j];}
s[n,0]=c2[n,0]*g[n,0];
for(j=1,j<N,j++) {s[n,j]=s[n,j-1]+c2[n,j]*y[n-i,j];}
for(j=0,j<N,j++) {e1[n,j]=e1[n-1,j]-heffa*s[n,j]*e[n];}
v[n]=0; for(j=0,j<N,j++) {v[n]=v[n]+c2[n,j]*h[n-i,j];}
q[n,0]=c1[0]*y[n,0];           // c1[N]-известная характеристика участка ВОС
for(j=1,j<N,j++) {q[n,j]=q[n,j-1]+c1[j]*y[n-i,0];} // Учитываем влияние участка ВОС
for(j=0,j<N,j++) {w[n,j]=h[n,j]+y[n,j];}
// выводим на ЦАП значение массива у[n,N]
// Ждем следующего запроса на инициализацию обработчика прерывания
.....

```

Рис. 3. Структурная схема модели адаптивной системы индивидуальной акустозащиты (УНМБУ – узел настройки микропроцессорного блока управления)

оцифрованных аналоговых сигналов цифровых сигналльных процессоров (DSP). Полученный сигнал в противофазе к исходному сигналу выводится через ЦАП и складывается в сумматоре с сигналом от источника полезного сигнала. Таким образом, излучатели системы воспроизводят сумму полезного сигнала и сигнала, противофазного к внешнему шумовому полю.

В адаптивных САГ помимо вышеперечисленных систем датчиков исходного поля дополнительно используются системы датчиков сигнала ошибки гашения. Вырабатываемый ими сигнал является управляющим для блока управления, т.е. этот сигнал используется для воздействия на коэффициенты фильтров блока управления и, перестраивая их с помощью специальных адаптивных алгоритмов, минимизирует

сигнал ошибки. Структурная схема адаптивной системы и листинг кода программы для ADSP2181 представлены на рис. 3.

Реализуемые в адаптивных системах алгоритмы минимизации сигнала ошибки, например, алгоритм Уидроу-Хоффа или алгоритм наименьших квадратов, интерпретируют значения коэффициентов фильтров блока управления как начальные значения и адаптивно подстраивают их, отслеживая изменения внешнего шумового поля. Эффективность действия этих алгоритмов в сильной степени зависит от влияния волновой обратной связи, поэтому в настоящее время появляются модификации этих алгоритмов с повышенной устойчивостью к влиянию обратной связи.

Необходимо заметить, что при отсутствии полезного сигнала адаптивные алгоритмы довольно успешно справляются с задачей фильтрации и влияние обратной связи невелико. Но при подаче полезного сигнала для эффективного выделения сигнала ошибки гашения необходимо реализовать очень сложные алгоритмы опознавания и фильтрации. По этой причине все реализованные на сегодняшний день системы индивидуальной активной акустозащиты представляют собой неадаптивные системы.

Выбор конкретного алгоритма позволяет экспериментально определить преимущества и недостатки каждой из структур для конкретных условий эксплуатации.

Конструктивная реализация систем активной индивидуальной защиты

Конструктивно системы индивидуальной защиты могут быть выполнены в виде облегченных головных телефонов открытого или закрытого типа или в виде слухового аппарата, т.е. миниатюрного головного телефона (наушника-пробки) с автономным блоком управления. Второй вариант имеет ряд преимуществ, например, обладает меньшими габаритными размерами и массой, эргономичностью излучателя, но в силу ряда ограничений, рассмотренных ниже, практическая реализация этого варианта весьма затруднительна. В качестве примера реализации системы индивидуальной защиты первого вида можно привести продукцию фирм Sennheiser (ФРГ) и Koss (США) (рис. 4).

Модель QZ2000 (Quiet Zone 2000) разработана на основе базовой модели портативных наушников серии Porta PRO, обладающей при весьма скромных габаритных размерах и массе высокими техническими характеристиками: диапазон частот (по уровню 3 дБ) - 15-25000 Гц, чувствительность 101 дБ/мВт. Блок управления расположен на соединительном кабеле из бескислородной меди (FC) и питается от двух батарей формата "AA" (1,5 В). Комплект батарей рассчитан на более чем 200 ч работы. Излучатели выполнены по самым передовым технологиям: магнитные системы изготовлены из неодимового сплава, а диафрагмы - из майлара толщиной 16 мкм. Блок управления содержит раздельные для правого и левого каналов АЦП, ЦАП и цифровой сигнальный процессор (DSP), работающий в формате с фиксированной точкой. Он выполняет функции цифровой фильтрации, генерации противофа- зы и с помощью специализированных алгоритмов позволяет оперативно отслеживать изменения внешнего поля. Конструктивная реализация активных наушников HDC 451 фирмы Sennheiser практически ничем не отличается от вышеупомянутой, за исключением технических характеристик: диапазон частот - 20-18000 Гц, максимальный уровень внешнего шума 100 дБ.



Рис. 4. Активные наушники фирм Sennheiser (модель HDC 451 NoiseGard) и Koss (Quiet Zone 2000)

Микроминиатюризация акустических преобразователей - основная проблема построения эффективных САГ индивидуальной защиты

Уменьшение размеров акустических преобразователей, снижение их массы и улучшение их эргономичности являются одной из важнейших проблем проектирования системы индивидуальной активной акустозащиты. Размещение их в амбушюрах головных телефонов накладывает ограничения не только на размеры датчиков внешнего поля, но и на диаграмму их направленности, динамический диапазон, форму АЧХ. Микрофоны должны обладать при минимальных размерах круговой диаграммой направленности, динамическим диапазоном не менее 100 дБ, плоскими ФЧХ и АЧХ и малыми переходными искажениями. Очевидно, что классические динамические микрофоны не удовлетворяют вышеперечисленным требованиям. В данном случае целесообразно использовать конденсаторные или электретные микрофоны. К их недостаткам следует отнести невозможность работы без внешнего блока питания. Желательно также наличие малошумящего усилителя с высоким входным сопротивлением для уменьшения шумов и наводок. Но эти недостатки с лихвой окупаются высокими техническими характеристиками. В качестве примера можно привести конденсаторный микрофон MKE 2 Р-С фирмы Sennheiser (рис. 5). При диаметре всего 4 мм он обладает следующими техническими характеристиками:

- неравномерность АЧХ в диапазоне 20-20000 Гц меньше 3 дБ;
- динамический диапазон 130 дБ;
- чувствительность ЮмВ/Па.

Для получения таких параметров также не обойтись без высоких технологий. Сверхтонкие пленки из полимерных материалов со слоями металлизации, полученными с по-

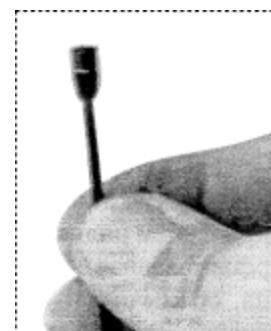


Рис. 5. Конденсаторный микрофон MKE 2 Р-С фирмы Sennheiser

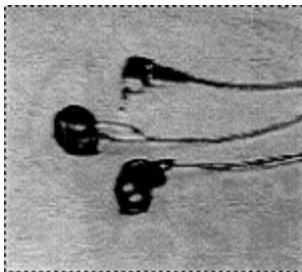


Рис. 6. Миниатюрные наушники фирмы SONY

воспроизведения низких частот, где в основном и приходится генерировать противофазный сигнал, необходимо, чтобы подвижная система излучателя перекачивала значительный объем воздуха. Этого можно добиться двумя путями:

- за счет увеличения диаметра диафрагмы;
- за счет увеличения хода подвижной системы.

Очевидно, что при конструктивной реализации системы индивидуальной акустозащиты в виде слухового аппарата диаметр излучателя не должен превышать 1,5—2 см, а диаметр рупора не может быть больше диаметра слухового прохода. В этой ситуации при разработке миниатюрных излучателей идут по пути увеличения длины хода диаграммы за счет использования более мощной магнитной системы (как правило, из неодимовых сплавов) и применения резонансных систем — аналогов фазоинверторных систем и систем с пассивным излучателем в громкоговорителях. В качестве примера можно привести миниатюрные головные телефоны MDR-ED238ML фирмы SONY (рис. 6). При диаметре диафрагмы 16 мм они обеспечивают весьма равную АЧХ вплоть до 70-80 Гц за счет применения неодимовых магнитов и системы Twin Turbo — аналога фазоинверторной системы. Дополнительно коррекция АЧХ в области низких частот может осуществляться с помощью DSP, MDR-ED238ML методами цифровой фильтрации. Методы цифровой обработки позволяют получить АЧХ практически любой формы и скорректировать ее таким образом, чтобы результирующая форма характеристики по звуковому давлению была близка к идеальной.

* * *

Лабораторно-техническая установка для автоматизированных исследований микропроцессорных неадаптивных систем индивидуальной активной акустозащиты, реализованная на кафедре ИУ-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана, обеспечивает подавление акустических шумов в диапазоне 20-500 Гц на 15-20 дБ. Эффективность подавления не одинакова в указанном частотном

диапазоне и имеет разброс ± 5 дБ, вызванный неравномерностью АЧХ датчиков и излучателей, паразитными резонансами корпуса головных телефонов и влиянием обратной связи. Система реализована на базе головных телефонов Porta PRO фирмы Koss, сигнального процессора Neuro Matrix 6403 НТЦ "Модуль" (или комплекса EZ-KIT 21xxx, Analog Devices), аналогоцифровых и цифроаналоговых преобразователей фирмы Analog Devices. Используемый в Neuro Matrix 6403 сигнальный процессор предназначен для работы в формате с фиксированной точкой. Его тактовая частота 50 МГц. АЦП и ЦАП — 16-разрядные, что в сочетании с методами интерполяции и цифровой фильтрации позволяет получить достаточно высокую точность преобразования и снизить шумы квантования. Система позволяет достичь теоретически возможного ослабления внешнего сигнала до 22-25 дБ, но это требует отладки алгоритмов работы DSP и тщательного подбора коэффициентов усиления в трактах сигналов микрофонов и излучателей для согласования динамических диапазонов электроакустических преобразователей с АЦП/ЦАП.

В настоящее время результаты разработки системы индивидуальной активной акустозащиты находят применение при создании систем коллективной акустозащиты и разработке специализированных вариантов индивидуальной шумозащиты, ориентированных на различные условия эксплуатации в авиации, на железнодорожном транспорте и при использовании сильношатающегося оборудования (мотопилы, различных вибраторов и т.п.).

Список литературы

1. **Власов А.И.** Современное состояние и тенденции развития теории и практики активного гашения волновых полей // Приборы и системы управления. 1997, № 11. С.59-70.
2. **Schachnov V.A., Vlasov A.I.** Das Realisierungskonzept der aktiven Unterdruckung des Akustikalarms der Electronengerate // Proceeding of 15th International Congress of Acoustics. Trondheim (Norway). 1995. P. 335-339.
3. **Olson H., May E.G.** Electronic sound absorber // Acoust. Soc. America. 1953, V. 25. N. 6. P. 1130-1136.
4. **Гвоздак А.** DSP системы для IBM PC // Современные технологии автоматизации 1998, № 1. С. 18-25.
5. **Шахнович И.** Отечественный процессор цифровой обработки сигналов NM 6403 // Электроника: наука, технология, бизнес. 1999. № 2. С.30-33.
6. **Sennheiser.** Hauptkatalog.
7. **Sony.** Генеральный каталог 1998/99.
8. **Noise Control in Russia / Editorial board: O. Rudenko, S. Rybak.** NPK Informatica, 1996. 263 p
9. **Власов А.И., Шахнов В.А.** Концепция активного подавления акустических шумов офисного оборудования // Сб. докл. научно-практической конф. "Новое в безопасности жизнедеятельности и экологии". СПб, 1996 С. 201-204.
10. [htth://www.sennheiser.com](http://www.sennheiser.com)
11. [htth://www.koss.com](http://www.koss.com)
12. [htth://sony.com](http://sony.com)
13. [htth://activ.iu4.bmstu.ru](http://activ.iu4.bmstu.ru)

УДК 621.382.017.71:621.384.3:519,3

А.А. Мельников, канд.техн. наук, доц.,
Московский государственный институт радиотехники,
электроники и автоматики
(Технический университет)

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ СТРУКТУРАХ

Предложена методика расчета температурных полей в многослойных фотоприемных структурах, иллюстрированная примером расчета тепловых режимов гибридного матричного фотоприемника ИК-диапазона на основе узкозонных твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ (KTP).

Введение

Развитие полупроводниковой микроэлектроники стимулирует появление множества приборов, которые представляют собой сложные неоднородные многослойные конструкции. Это, например, фотоприемники и фотоприемные устройства для видимой, УФ- и ИК-областей спектра на основе различных полупроводниковых материалов (Si, Ge, GaAs, PbS, PbSe, InAs, $Cd_xHg_{1-x}Te$). Разработка этих приборов невозможна без детального анализа их тепловых режимов.

Точные расчеты тепловых режимов работы многослойных фотоприемных структур (МФС), в состав которых входят детектирующая и считающая структуры, в ряде практических случаев не могут быть выполнены из-за отсутствия приемлемых аналитических методов решения задач теплопередачи в этих структурах и ввиду сложности их конструктивных форм, характера граничных условий, разнообразия теплофизических характеристик применяемых полупроводниковых материалов, сложных законов распределения источников теплоты по объему структуры.

Поэтому актуальна проблема разработки эффективных численных методик расчета тепловых процессов в МФС. В основу разработанной численной методики расчета тепловых режимов МФС в настоящей статье положен метод конечных элементов (МКЭ).

Обобщенные тепловые модели МФС

Несмотря на многообразие конструктивных форм и функциональных особенностей фотоприемных структур можно предложить несколько обобщенных тепловых моделей, охватывающих широкий круг приложений.

Рассмотрим две такие обобщенные тепловые модели, из которых первая соответствует многослойной области без аномальных границ раздела сред, а вторая - многослойной области с аномальными границами раздела сред.

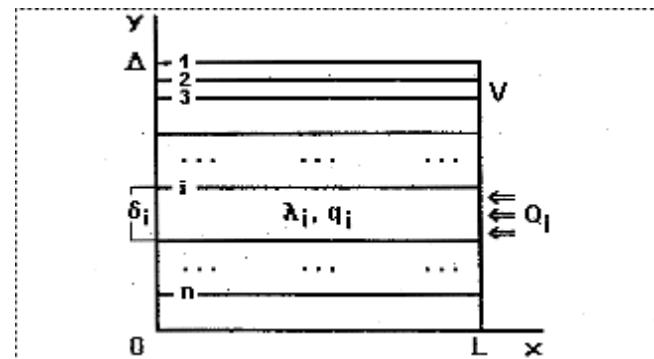


Рис. 1. Обобщенная тепловая модель МФС без аномальных границ раздела сред

Обобщенная тепловая модель, представленная на рис. 1, включает целый ряд практических задач расчета температурных полей в монолитных МФС.

В монолитных МФС детектирующая и считающая структуры изготавливаются из одного полупроводникового материала.

Рассматриваемая область V шириной L и толщиной Δ состоит из n слоев, причем i -й слой характеризуется толщиной δ_i , коэффициентом теплопроводности λ_i . Источниками теплового поля являются внутренние источники теплоты с удельной мощностью q_i и тепловые потоки на поверхности структуры с плотностью Q_i . Модель, изображенная на рис. 1, состоит из однородных параллельных слоев и не содержит аномальных границ раздела сред, так как:

- все границы слоев совпадают с одноименным семейством координатных поверхностей $y = \text{const}$;
- теплопроводность слоев λ_i не изменяется вдоль указанных границ.

Обобщенная тепловая модель, изложенная на рис. 2, относится к гибридным МФС. В этих структурах детектирующая и считающая структуры изготавливаются из различных материалов.

Эта модель содержит две аномальные границы раздела сред, являющиеся границами раздела слоев $n-2$, $n-1$ и $n-1$, n (на этих границах зависимость теплопровод-

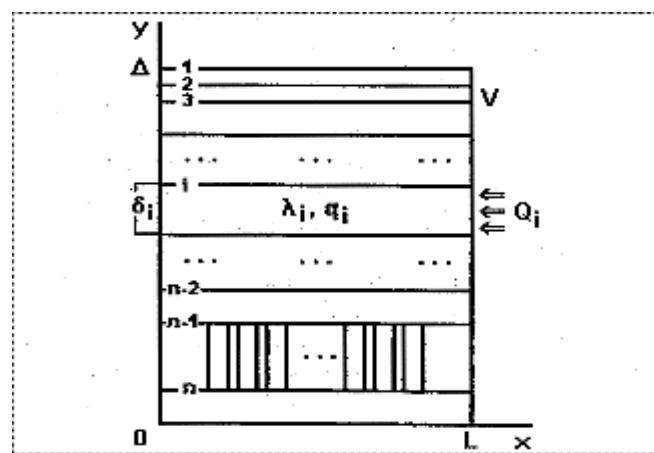


Рис. 2. Обобщенная тепловая модель МФС с аномальными границами раздела сред

ности от координаты x имеет ступенчатый вид). Такие границы характерны, например, для гибридных матричных фотоприемников ИК-диапазона.

Математическая постановка задачи расчета температурных полей в МФС

В наиболее общем виде температурное поле в МФС, обобщенные тепловые модели, которых представлены на рис. 1 и рис. 2, определяется из уравнения теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q \quad (1)$$

при граничных условиях

$$T = T_s \text{ на } S_1; \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + Q = 0 \text{ на } S_2; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha(T - T_0) = 0 \text{ на } S_3; \quad (4)$$

и начальном условии

$$T = T_* \text{ при } t = t_0. \quad (5)$$

Кроме этого, температурное поле в МФС удовлетворяет условиям сопряжения на границах раздела слоев i и j :

$$T_i = T_j; \quad (6)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_i} = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_j}, \quad (7)$$

где T – температура; ρ – плотность материала; c – теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; q – удельная мощность источников теплоты, которая считается положительной, если теплота подводится к структуре; Q – поток теплоты на части границы S , который считается положительным, если теплота теряется структурой; α – коэффициент теплообмена с окружающей средой с температурой T_0 ; T_s – температура на части границы S ; T_* – начальное распределение температуры; $S = S_1 \cup S_2 \cup S_3$ – полная граница многослойной области V ; n – внешняя нормаль к границе S .

Модель (1)–(7) является математической моделью для расчета температурных полей в МФС. При расчете температурных полей в МФС мы будем пользоваться частными моделями, соответствующими общей. Отметим также, что в ряде практических случаев на боковых поверхностях тепловых моделей, представленных на рис. 1 и 2, имеет место условие адиабатичности.

Поэтому вместо граничного условия (4) можно использовать граничное условие

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0. \quad (8)$$

Если температурное поле в МФС стационарно, т.е. процесс установившийся, то уравнение (1) преобразуется к виду

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q = 0. \quad (9)$$

В случае, когда теплофизические характеристики являются только функциями декартовых координат, из (9) получаем

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = 0. \quad (10)$$

Это уравнение имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q = 0. \quad (11)$$

Уравнение (11) применяется для решения двумерных задач расчета температурных полей в МФС с плоскостной симметрией при следующих граничных условиях:

$$T = T_s \text{ на } S_1; \quad (12)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + Q = 0 \text{ на } S_2; \quad (13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ на } S_3; \quad (14)$$

и условиях сопряжения на границе раздела слоев i и j (6), (7).

Таким образом, задача расчета температурных полей в МФС сводится к решению сопряженной задачи теплопроводности при разнородных граничных условиях, заданных на различных участках границы S многослойной области V .

Методика решения задач расчета температурных полей в МФС методом конечных элементов

В основу методики решения краевой задачи (11)–(14), (6)–(7) положен МКЭ. Можно показать, что решение этой задачи эквивалентно минимизации функционала [1]

$$F = \int_V \frac{1}{2} \left[\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 - 2qT \right] dV + \int_{S_2} QT dS. \quad (15)$$

Для упрощения дальнейших преобразований введем матрицы

$$[b] = \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} & \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix}^T. \quad (16)$$

$$[c] = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}. \quad (17)$$

С учетом обозначений (16), (17) функционал (15) после преобразований можно записать в виде

$$F = \int_V \frac{1}{2} \{ [b]^T [c] [b] - 2q T \} dV + \int_{S_2} Q T dS. \quad (18)$$

Предположим далее, что область V разбита на непересекающиеся конечные элементы с системой базисных функций N_i , $i=1,2,3$. Введем в рассмотрение функции $T^{(i)}$, определенные на отдельных конечных элементах. Элементарный вклад конечного элемента $V^{(i)}$ в общие значения функционала (18) определяется равенством

$$F^{(i)} = \int_{V^{(i)}} \frac{1}{2} [b^{(i)}]^T [c^{(i)}] [b^{(i)}] dV - \int_{V^{(i)}} q^{(i)} T^{(i)} dV + \int_{S_2^{(i)}} Q^{(i)} T^{(i)} dS. \quad (19)$$

С учетом (19) выражение (18) можно переписать следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^N F^{(i)}, \quad (20)$$

где N – общее число элементов, на которые разбита многослойная область V .

Для того чтобы минимизировать функционал F , необходимо продифференцировать выражение (18) по $\{T\}$ и результат приравнять нулю:

$$\frac{\partial F}{\partial \{T\}} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial F^{(i)}}{\partial \{T\}} = 0, \quad (21)$$

где $\{T\}$ – узловые значения искомой функции T . Искомая функция T может быть определена для каждого конечного элемента через базисные функции N_i следующим образом: $T^{(i)} = [N^{(i)}] \{T\}$.

Таким образом,

$$[b] = \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1^{(i)}}{\partial x} & \frac{\partial N_2^{(i)}}{\partial x} & \frac{\partial N_3^{(i)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1^{(i)}}{\partial y} & \frac{\partial N_2^{(i)}}{\partial y} & \frac{\partial N_3^{(i)}}{\partial y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} = [D^{(i)}] \{T\}. \quad (22)$$

После дифференцирования выражения (20) по $\{T\}$ с учетом выражений (19) и (22) и приравнивания результата нулю получим систему уравнений:

$$[G] \{T\} = [F], \quad (23)$$

где

$$[G] = \sum_{i=1}^N [g^{(i)}]; \quad (24)$$

$$[F] = - \sum_{i=1}^N [f^{(i)}]; \quad (25)$$

$$[g^{(i)}] = \int_{V^{(i)}} [D^{(i)}]^T [C^{(i)}] [D^{(i)}] dV; \quad (26)$$

$$[f^{(i)}] = - \int_{V^{(i)}} q^{(i)} [N^{(i)}] dV - \int_{S_2^{(i)}} [N^{(i)}] Q^{(i)} dS. \quad (27)$$

Для учета граничных условий Дирихле (12) систему уравнений (23) преобразуем с помощью следующего алгоритма. Пусть для определенности задано числовое значение температуры T_i , тогда все преобразования матричного уравнения (23) сводятся к следующему: все коэффициенты i -й строки матрицы $[G]$, за исключением диагонального, приравниваются нулю, i -я компонента вектора $[F]$ заменяется на произведение $G_{ii} T_i$; все остальные уравнения преобразуются вычитанием произведения $G_{ji} T_i$ из F_j и подстановкой $G_{ji} = 0$, $j = 1, 2, 3; i \neq j$.

Некоторые аспекты численного решения задач расчета температурных полей в МФС

Расчет температурного поля в МФС включает три этапа:

- описание геометрии, физических характеристик, генерацию конечно-элементной сетки;
 - расчет с помощью МКЭ;
 - визуализация и интерпретация результатов расчета.
- Эти три этапа на уровне программного обеспечения выполняются отдельными модулями:
- модулем ввода данных (препроцессором);
 - модулем вычислений (процессором счета);
 - модулем вывода результатов (постпроцессором).

Препроцессор предназначен для ввода и подготовки информации, необходимой для решения задачи расчета температурного поля в МФС на ПЭВМ методом конечных элементов. Он осуществляет следующие функции:

- описание геометрии МФС;
- генерацию конечно-элементной сетки;
- указание областей и границ.

Генерация конечно-элементной сетки в области заключается в формировании совокупности узлов и совокупности конечных элементов, обеспечивающих приемлемую дискретизацию области. Узлы определяются координатами, тогда как элементы характеризуются типом и перечнем узлов.

Операция указания областей и границ позволяет уточнить следующую информацию:

- описание физических характеристик материалов;

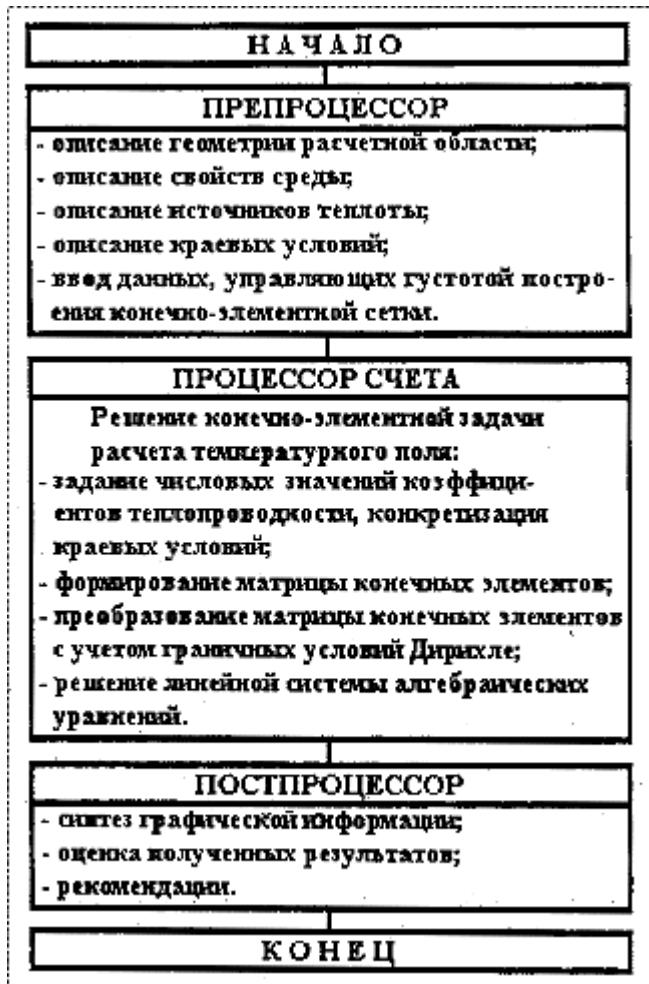


Рис. 3. Схема алгоритма расчета температурных полей в МФС

- описание источников;
- описание граничных условий.

Процессор счета получает на входе описание конечно-элементной сетки, физические характеристики и граничные условия, а на выходе выдает значения искомых величин в каждом узле сети. Модуль вычислений выполняет следующие функции:

- построение подматриц и подвекторов на каждом конечном элементе;
- объединение этих подматриц и подвекторов для формирования матрицы и правой части линейной системы уравнений;
- учет граничных условий;
- решение линейной системы уравнений.

Постпроцессор выполняет следующие функции:

- извлекает значащую информацию;
- представляет численную информацию в графической форме для облегчения ее восприятия и интерпретации.

Схема алгоритма расчета температурных полей в МФС представлена на рис. 3, а структура комплекса программ расчета – на рис. 4.

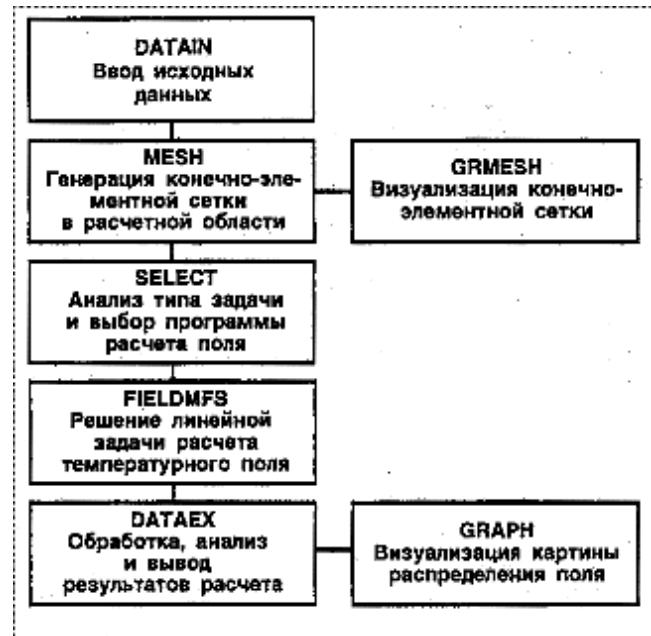


Рис. 4. Структура комплекса программ расчета температурных полей в МФС методом конечных элементов

Комплекс программ состоит из отдельных пакетов программ, каждый из которых выполняет вполне определенные функции. Пакет программ MESH предназначен для генерации конечно-элементной сетки в расчетной области, пакет FIELDMFS – для решения задач расчета распределения температурных полей в МФС, пакет GRAPH – для визуализации результатов расчета в виде картин распределения температурных полей и т.д.

Для решения системы уравнений (15), полученной в результате дискретной аппроксимации по МКЭ сопряженной краевой задачи (1)–(5), использован метод треугольника разложения.

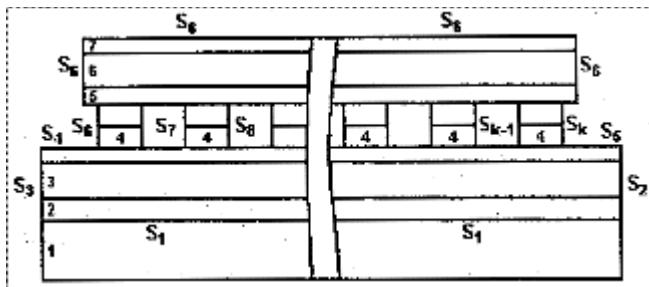
Исследование тепловых режимов работы гибридной МФС ИК-диапазона на основе твердых растворов Cd_xHg_{1-x}Te (КРТ)

С помощью разработанного комплекса программ были рассчитаны температурные режимы работы гибридной МФС (рис. 5) с учетом геометрических размеров кристаллов, индиевых межсоединений, тепловыделений в кремниевой интегральной схеме (ИС), первичной обработки сигнала и известных теплоприкосновениях через границы S_4 и S_5 .

Расчет проводился для матричного фотоприемника с размером кристалла фотодиодной матрицы 7×7 мм и размером кристалла кремниевой ИС 10×10 мм. Высота индиевых межсоединений составляла 10 мкм при площади их сечений 50×50 мкм, теплофизические константы материалов МФП брались из работ [2, 3].

Решалось уравнение теплопроводности (11) с граничными условиями

$$T = 77 \text{ K} \text{ на } S_1; \quad (28)$$



$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + Q = 0 \text{ на } S_4, S_5; \quad (29)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ на } S_2, S_3, S_6, \dots, S_k \quad (30)$$

и условиях сопряжения границ раздела слоев i и j (6), (7).

В результате расчетов были получены зависимости максимальной температуры рабочего слоя КРТ от тепловыделений в кремниевой ИС, от теплопроводности клея, от теплопротиков через проволочные межсоединения

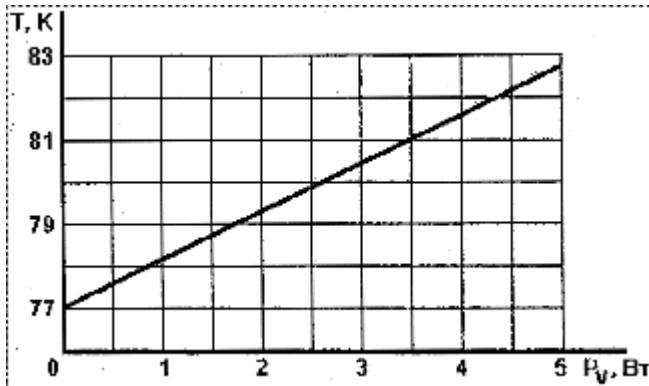


Рис. 6. Зависимость максимальной температуры рабочего слоя КРТ от тепловыделений в кремниевой ИС

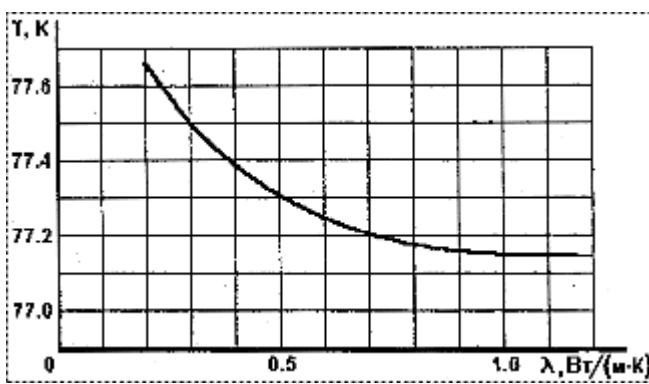


Рис. 7. Зависимость максимальной температуры рабочего слоя КРТ от теплопроводности клея

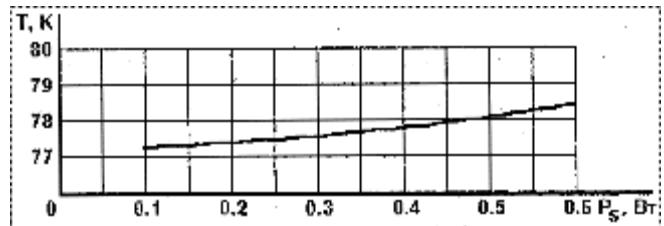


Рис. 8. Зависимость максимальной температуры рабочего слоя КРТ от теплопротиков через проволочные межсоединения кремниевой ИС с выводами корпуса

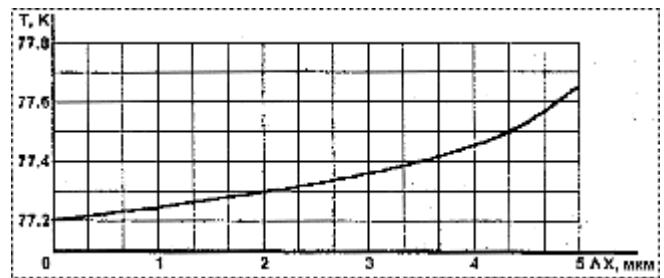


Рис. 9. Зависимость максимальной температуры рабочего слоя КРТ от рассогласования индивидуальных столбиков-контактов

ния кремниевой ИС с выводами корпуса и от рассогласования индивидуальных столбиков-контактов. Результаты расчетов показаны на соответствующих рисунках.

На рис. 6–9 показаны графики зависимости максимальной температуры рабочего слоя КРТ: от тепловыделений в кремниевой ИС при мощности теплопротиков через проволочные межсоединения кремниевой ИС с выводами корпуса $P_s = 0$, толщине клеевого слоя $\delta_{kl} = 0$ (рис. 6); от теплопроводности клея при мощности, выделяемой в кремниевой ИС, равной 0,5 Вт, мощности теплопротиков через проволочные межсоединения кремниевой ИС с выводами корпуса $P_s = 0,1$ Вт, $\delta_{kl} = 10$ мкм (рис. 7); от мощности теплопротиков через проволочные межсоединения кремниевой ИС с выводами корпуса при $P_V = 0,5$ Вт, $\delta_{kl} = 10$ мкм, $\lambda_{kl} = 0,2$ Вт/(м·К) (рис. 8); от рассогласования индивидуальных столбиков-контактов при $P_V = 0,5$ Вт, $\delta_{kl} = 10$ мкм, $\lambda_{kl} = 0,2$ Вт/(м·К) (рис. 9).

На рис. 10 приведено распределение температурного поля в рабочем слое КРТ при $P_V = 0,5$ Вт, $\delta_{kl} = 10$ мкм, $\lambda_{kl} = 0,2$ Вт/(м·К), $P_s = 0,1$ Вт.

Результаты расчетов показали, что рассогласование индивидуальных столбиков-контактов при сборке гибридных

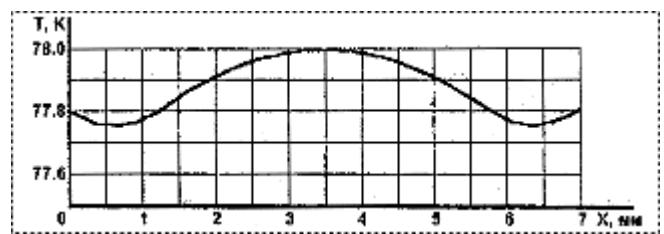


Рис. 10. Распределение температуры в рабочем слое КРТ

многослойных фотоприемных структур не должна превышать 3 мкм, в противном случае рабочий слой КРТ будет иметь недопустимо высокую температуру, так как ухудшается его охлаждение.

* * *

Использование разработанной методики позволяет отказаться от дорогостоящих и часто невозможных экспериментов, определить целесообразность той или иной технологии изготовления приборов и устройств на основе многослойных структур, повысить качество и надежность изделий микросистемной техники.

Список литературы

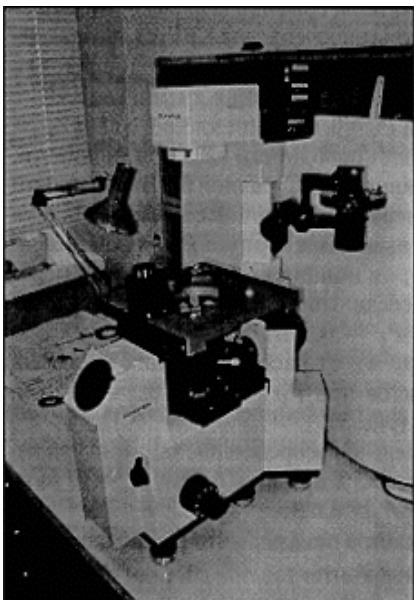
- Melnikov A.A., Kulchitsky N.A. and Khryapov V.T.** Temperature field mathematical modeling in multilayer semiconductor structures being produced and functioning in microgravity // Hydromechanics and Heat/Mass Transfer in Microgravity Reviewed Proceedings of the First International Symposium on Hydromechanics and Heat/Mass Transfer in Microgravity Gordon and Breach Science Publishers. 1992. P. 363-366.
- Берченко Н.Н., Кресь В.Е., Средин В.Г.** Полупроводниковые твердые растворы и их применение, М.: Всесоюзный научно-исследовательский институт полупроводников, 1982.
- Охотин А.С., Пушкарский А.С., Горбачев В.В.** Техофизические свойства полупроводников, М.: Атомиздат, 1972. 200 с.



- Компания ЗАО НТ-МДТ основана в 1991 году группой выпускников МФТИ. Основное направление бизнеса - молекулярные технологии.

НТ-МДТ – российский лидер по производству сканирующих зондовых микроскопов и изделий микромеханики (кантилеверов) для науки и промышленности. Высокое качество, технические характеристики и опыт компании в области международного маркетинга обеспечили компании возможность продавать высокотехнологическую (high tech) продукцию в более чем 12 стран мира, среди которых Япония, США, Израиль, Канада, Франция, Германия, Нидерланды, Китай, Тайвань.

Сканирующие зондовые микроскопы серии СОЛВЕР



P47БИО

Микроскопы предоставляют возможность исследования различных поверхностей со сверхвысоким разрешением – от атомарного до долей микрометра. Реализуется широкий диапазон режимов измерения, позволяющих получать информацию о топографии с распределением магнитных, электростатических сил, работой выхода, локальными свойствами проводимости и т.д.

СОЛВЕРЫ Р47ВИО, Р47

Модель Солвер Р47БИО – специализированный сканирующий зондовый микроскоп для биологических и медицинских исследований на воздухе и в жидкостях. Прибор сочетает в себе преимущества стандартных оптических методик измерения (светлое поле, флуоресценция, фазовый контраст, дифференциальный-интерференционный контраст) с использованием инвертированного оптического микроскопа (на базе Olympus IX-70 или BIOLAM-P) с возможностью получения предельных (молекулярных) разрешений неразрушающими методами сканирующей зондовой микроскопии.

Модель Солвер Р47 – специализированный сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) для проведения фундаментальных научных исследований, решения прикладных и технологических задач на малых образцах со сверхвысоким разрешением, вплоть до атомарного разрешения кристаллической решетки.

Режимы измерения СЗМ: STM/AFM/LFM/MFM/EFM/SCM/SKM/Phase Imaging

Технические характеристики Солверов

	P47BIO	P47
Максимальный размер образца, мм	62×62	40×40
Разрешение по Z, Å°	2	0,5
Минимальный шаг сканирования (типы сканеров), мкм	0,07	0,015
Диапазон сканирования (типы сканеров), мкм	50×50×2, 90×90×5	14×14×16, 50×50×3
Позиционирование образца, мм	30×30	5×5

Россия, 103460, Москва, Гос. НИИФП им. Ф.В. Лукина, НТ-МДТ;
тел.: (095) 535-0305, 535-2493, 535-8369, факс: (095) 535-6410;
e-mail: spm@ntmdt.zgrad.ru, <http://www.ntmdt.ru>

УДК 621.3.049.76:683.9

А.В. Корляков, канд. физ.-мат. наук, доц.,

В.В. Лучинин, д-р техн. наук,

И.В. Никитин, аспирант,

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Центр микротехнологии и диагностики

ПРИМЕНЕНИЕ SiC-МИКРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

Рассмотрены приборы на основе карбида кремния, которые благодаря термической устойчивости последнего и его термомеханической совместимости с рядом материалов, обладающих диэлектрическими и пьезоэлектрическими свойствами, способны работать в экстремальных условиях, а по своим параметрам относятся к микросистемной технике. Это инфракрасные излучатели, термоанемометрические датчики, термомикрореакторы, различные термонагревательные элементы.

Введение

Традиционные представления о тепловых процессах как об относительно медленных и трудно поддающихся управлению, сформировавшиеся в макромире, теряют свою значимость при переходе на микроуровень. Управляемые нагрев и охлаждение ограниченных микрообъемов можно осуществлять с довольно большой скоростью, в первую очередь, благодаря эффектам, связанным с масштабированием. Это же относится и к скорости измерения ряда физических параметров с использованием тепловых характеристик. Современная микротехнология позволяет также осуществлять и эффективную тепловую развязку отдельных элементов конструкции. Сенсоры и актоаторы, функционирующие на основе тепловых процессов, отличаются простотой и низкой стоимостью, они достаточно хорошо адаптированы к традиционным материалам и технологиям.

В настоящей статье основное внимание уделено приборам на основе карбида кремния. Термическая устойчивость карбида кремния и термомеханическая совместимость с рядом материалов, обладающих диэлектрическими и пьезоэлектрическими свойствами, позволяют создавать уникальные объекты микросистемной техники, способные работать в экстремальных условиях [1].

Базовая структура сенсоров и актоаторов тепловых микросистем

Базовая структура ряда тепловых микросистем (микроизмерителей, микроизлучателей, микронагревателей) представляет собой резистор на тонкой мемbrane (рис. 1). Главной особенностью таких микросистем

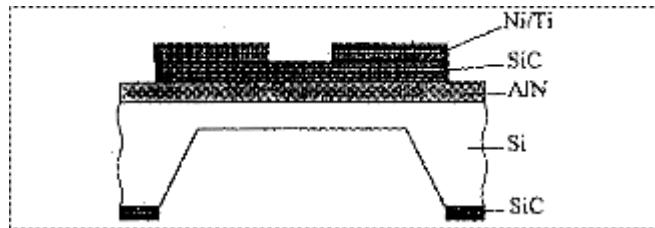


Рис. 1. Базовая структура семейства тепловых микросистем на основе SiC

являются малые объемы нагреваемых областей, их тепловая изоляция и низкая инерционность, что обеспечивается расположением SiC-резистора на тонкой мембране. Диэлектрические слои, например нитрида алюминия, изолируют SiC-резистор от подложки [2]. Мембрана в подложке может быть сформирована как жидкостным анизотропным, так и "сухим" плазмохимическим травлением. В последнем случае можно получить практически отвесные стенки мембранны [3].

Классическая температурная зависимость сопротивления объемного полупроводникового резистора имеет вид:

$$R = R_\infty \exp(B/T)$$

где R_∞ – коэффициент, численно равный сопротивлению резистора при температуре, стремящейся к бесконечности; B – коэффициент температурной чувствительности резистора.

Однако, как показали проведенные нами исследования, терморезисторы на основе слоев карбида кремния, полученных методом ионно-химического осаждения, лучше аппроксимируются другой температурной зависимостью сопротивления:

$$R = R_0 \exp(-T/B), \quad (1)$$

где R_0 – коэффициент, численно равный сопротивлению резистора при температуре, стремящейся к нулю. Справедливость данного выражения наблюдалась нами при температурах до 1000 К (при $R_0 = 20,5$ кОм, $B = 380$ К).

Отрицательное значение температурного коэффициента сопротивления позволяет сделать предположение о наличии участка отрицательного дифференциального сопротивления на вольт-амперной характеристике (ВАХ).

Рассмотрим ВАХ реального терморезистора, используя полученное выражение для температурной характеристики. Для этого запишем уравнение теплового баланса:

$$U^2/R = I^2 R = H(T - T_a), \quad (2)$$

где H – коэффициент теплообмена, Вт/К; T_a – температура окружающей среды.

Используя выражения (1) и (2), можно записать ВАХ терморезистора в параметрическом виде:

$$\begin{cases} U = \sqrt{R_0 H \exp\left(-\frac{T}{B}\right)(T - T_a)}; \\ I = \sqrt{\frac{H}{R_0} \exp\left(-\frac{T}{B}\right)(T - T_a)}. \end{cases} \quad (3)$$

В результате анализа системы уравнений (3) получим выражение для дифференциального сопротивления терморезистора:

$$\frac{dU}{dI} = R_0 \exp\left(-\frac{T}{B}\right) \left(1 - \frac{(T - T_a)^2}{B^2}\right).$$

Отсюда следует условие возникновения участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением:

$$|T - T_a| > B,$$

которое для исследованных нами терморезисторов ($B = 380$ К) примет вид

$$T > T_a + 380\text{ K}.$$

Температура терморезистора в точке максимума напряжения на ВАХ

$$T = T_a + B. \quad (4)$$

Отсюда можно сделать вывод о том, что для рассмотренных видов резисторов температура в точке максимума напряжения определяется только температурой окружающей среды и материалом чувствительного элемента и не зависит от условий охлаждения терморезистора. На графике ВАХ (рис. 2) видно, что статическое сопротивление в точках максимума одинаковое (пунктирная линия). Зависимости рассчитаны для различных коэффициентов теплообмена: зависимость 1 – для коэффициента теплообмена $H = 0,001$ Вт/К, зависимость 2 – для $H = 0,002$ Вт/К и зависимость 3 – для $H = 0,003$ Вт/К.

При рассмотрении тепловых процессов удобно воспользоваться методом аналогий, а именно – электротепловыми аналогиями. Эквивалентная тепловая схема терморезистора на мемbrane состоит из резистора R_T ,

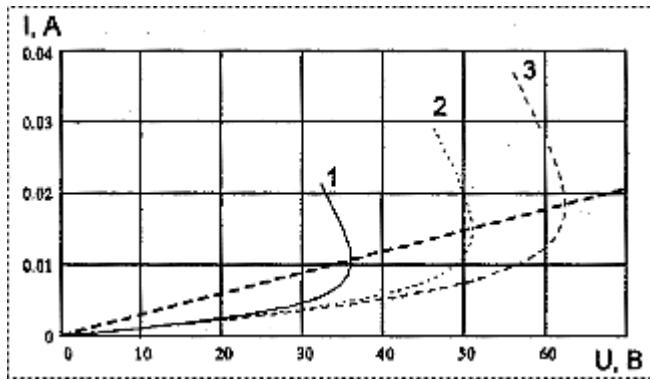
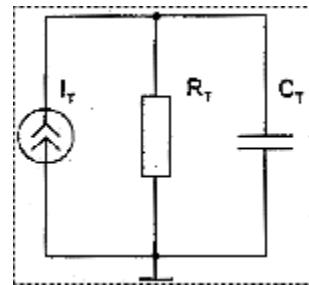


Рис. 2. ВАХ микронагревательной структуры при различных условиях охлаждения (коэффициентах теплообмена)

Рис. 3. Эквивалентная тепловая схема



конденсатора C_T и источника тока I_T (рис. 3). Резистор характеризует теплопередачу от мембраны на корпус и во внешнюю среду, конденсатор – теплоемкость мембраны, а источник тока – выделение теплоты при прохождении тока через терморезистор. В табл. 1 приведено соответствие аналогий тепловых и электрических величин [4]. Постоянная времени остыивания системы

$$\tau = RC = R_T C_T,$$

где R_T – тепловое сопротивление между мембраной и внешней средой (основанием чипа и воздухом); C_T – теплоемкость мембраны.

Представленная эквивалентная схема не учитывает теплопередачу за счет излучения, что потребовало бы введения дополнительного нелинейного элемента, например, аналога диода, аппроксимирующего функцию $\sim T^4$.

Таблица 1
Аналогии тепловых и электрических величин

Тепловая величина	Электрическая величина
Температура T , К	Напряжение U , В
Тепловой поток P , Вт	Сила тока I , А
Количество теплоты Q , Дж	Заряд q , Кл
Тепловое сопротивление R_T , К/Вт	Электрическое сопротивление R , Ом
Теплоемкость C , Дж/К	Электрическая емкость C , Ф

Инфракрасный излучатель

Выделение теплоты при протекании тока через резистор может сопровождаться излучением (видимым либо инфракрасным). Уникальность карбидокремниевого (SiC) излучателя состоит в том, что его спектр излучения близок к спектру излучения абсолютно черного тела, так как он имеет коэффициент теплового излучения (коэффициент черноты), близкий к единице. На рис. 4 (см. четвертую сторону обложки) показана

типичная спектральная характеристика созданного нами ИК микроизлучателя на основе базовой структуры при температуре нагревательного элемента 800 °C, при этом потребляемая микроизлучателем мощность составляет 2,5 Вт. На рис. 5 и 6 (см. четвертую сторону обложки) представлены фотографии ИК излучающего элемента и самого прибора в корпусе. Базовые параметры ИК излучателя на основе SiC представлены в табл. 2.

Уникальность излучателей данного типа заключается

Таблица 2

Базовые параметры ИК излучателя на основе SiC

Параметр	Значение
Диапазон сопротивлений (при 20 °C)	50 Ом ... 100 кОм
Постоянная времени	5 мс
Потребляемая мощность	0,5...3,0 Вт
Максимальная температура	1000 °C

в том, что они могут работать длительное время на открытом воздухе при температуре до 1000 °C без использования защитных покрытий, которые ухудшали бы их временные параметры и искали спектральную характеристику.

Область применения ИК микроизлучателей: дистанционный нагрев локальных областей твердого тела и жидкостей, ИК спектрометрия жидкостей и газов.

Термоанемометрические датчики

Основной проблемой, возникающей при измерении скоростей потоков с помощью термоанемометров, является зависимость их показаний от температуры потока. Поэтому приходится вводить дополнительный датчик температуры и схему компенсации влияния температуры на показания термоанемометра. Представляют интерес конструкции датчиков потока, в которых компенсация влияния температуры происходит не во внешней цепи, а в самом датчике, что облегчает применение таких датчиков и снижает их стоимость.

Наличие точки максимума напряжения на ВАХ резистора позволило нам предложить конструкцию датчика, которая дает возможность одновременно измерять скорость и температуру газового потока. Для этого измерительная схема должна поддерживать ток, питающий резистор, таким, чтобы напряжение на нем было максимальным. Определение положения точки максимума может быть получено добавлением малой переменной составляющей к основному питающему току. Таким образом, температура резистора, а следовательно, и его статическое сопротивление однозначно определяются температурой окружающей среды в соответствии с выражением (4), а мощность в точке максимума определяется только скоростью потока [5].

Высокие тепловая, химическая и радиационная стойкости карбида кремния позволяют использовать датчики данного типа в экстремальных условиях эксплуатации. Кроме того, благодаря расположению чувствительного элемента датчика на мемbrane улучшаются временные свойства датчика.

На основе базовой структуры нами разработаны и другие типы термических датчиков потока. Их особенностью является адаптация к условиям охлаждения, что обеспечивает расширение рабочего диапазона и повышение точности измерений. В одной из подобных конструкций применены два резистора [6]. Первый резистор находится на мембране и его температура поддерживается выше температуры окружающей среды

на определенную величину. Второй резистор, имеющий хороший тепловой контакт с кристаллом, измеряет температуру окружающей среды. Мощность, затрачиваемая на поддержание температуры первого резистора, пропорциональна коэффициенту теплоотдачи H , который, в свою очередь, связан со скоростью потока формулой Кинга:

$$H = k_1 + k_2 \sqrt{v},$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты, зависящие от конструкции датчика; v – скорость потока.

Чувствительность таких датчиков составляет порядка 1 В/(м/с) в диапазоне скоростей воздушного потока 0,1...10 м/с.

Микронагревательный инструмент

Микронагрев в локальных объемах и поддержание постоянства температуры, в том числе высокой температуры, в условиях воздушной среды определяют необходимость разработки и создания высокоэффективных микроструктур, интегрирующих малогабаритный источник теплоты – нагреватель и средства измерения температуры – температурный сенсор. Применение таких технологических микросистем в области медицины является весьма актуальным, так как одной из основных проблем хирургического вмешательства до сих пор остается обильное кровотечение в месте проведения разреза. Существующие лазерные и электрохирургические установки для коагуляции обладают целым рядом недостатков, которые сдерживают их внедрение [7]. Многие хирургические задачи, такие как стерилизация, коагуляция, деструкция, могут быть успешно решены применением локального воздействия высокой температуры.

Задача управления процессом коагуляции заключается, в первую очередь, в поддержании температуры лезвия в заданных пределах независимо от таких условий, как глубина погружения лезвия в ткань, скорость движения лезвия, параметры ткани. Температурный диапазон коагуляции для различных видов ткани находится в пределах 55...70 °C. Математическое моделирование и расчеты показали, что для обеспечения равномерности нагрева лезвия или создания требуемой картины теплового поля следует применять две или три секции микронагревателей, расположенных вдоль режущей кромки (рис. 7). На рис. 8 приведен профиль распределения температуры по длине лезвия, полученный математическим моделированием процессов

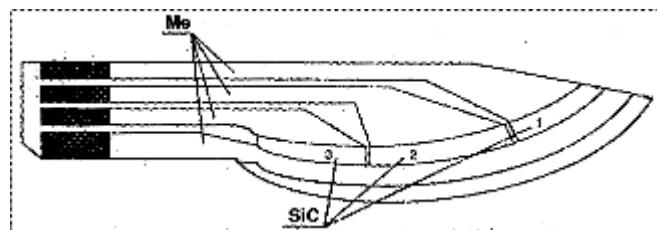


Рис. 7. Конструкция лезвия с нагреваемой режущей кромкой (1, 2, 3 - нагреватели)

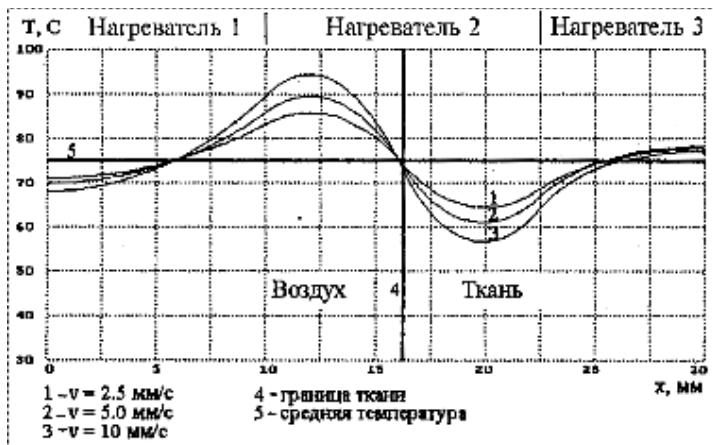


Рис. 8. Семейство кривых распределения температуры по длине нагреваемого лезвия при различных скоростях его движения

теплопередачи. Согласно тем же расчетам, максимальная необходимая для коагуляции мощность составляет 30 Вт [8]. Время реакции системы на изменение условий охлаждения составляет не более 0,2 с. В предложенной конструкции датчики температуры и нагреватели выполнены раздельно, так как высокая сила питающих токов нагревателей не позволяет использовать их в качестве датчиков температуры из-за большого уровня шумов и значительного падения напряжения на металлизации и контактных площадках. Напряжение питания скальпеля составляет 10... 12 В, что позволяет применить автономный источник питания и обеспечивает электробезопасность в работе.

Фотография сапфирового лезвия с несколькими микронагревателями, расположенными вблизи режущей кромки, представлена на рис. 9, а (см. четвертую сторону обложки). Схема управления поддерживает температуру лезвия в заданных пределах и позволяет управлять температурой с помощью компьютера (рис. 9, б, см. четвертую сторону обложки). Сигнал с датчиков температуры сравнивается с опорным сигналом, вырабатываемым микропроцессором в зависимости от требуемой температуры лезвия. Для повышения КПД работы схемы управление нагревателями осуществляется в ключевом режиме. Роль электронных ключей выполняют мощные МДП транзисторы.

Перспективность использования сапфира и карбида кремния в хирургии в первую очередь определяется их высокими механическими свойствами и биологической инертностью. Таким образом, данная разработка позволит осуществлять проведение уникальных хирургических операций с минимальными потерями крови и ускоренным заживлением операционных ран в результате протекания процессов коагуляции на лезвии режущего инструмента. Использование такого скальпеля особенно актуально при проведении неотложных операций в полевых условиях.

Термомикрореактор

Миниатюрные аналитико-технологические системы [9] представляют собой новый класс приборов для проведения исследований в микрообъемах с использова-

нием сверхмалых количеств веществ. Например, ДНК анализ стал важным методом современной медицины для идентификации личности, выявления скрытых инфекций. Часто в этих случаях количество анализируемого вещества достаточно мало, что делает прямое определение невозможным. Поэтому для увеличения анализируемой последовательности нуклеиновых кислот микронализитический чип оборудуется реактором с управляемыми нагревом и охлаждением для проведения полимеразной цепной реакции (ПЦР). Процесс ПЦР включает в себя ряд циклов нагрева (25-30). Каждый цикл увеличивает число ДНК в 2 раза. В результате проведения процесса термоциклирования единичная ДНК молекула может быть скопирована большое число раз для получения числа молекул, достаточного для легкого детектирования.

Одна из возможных конструкций реактора представлена на рис. 10. Наличие тонких пленок нитрида кремния дает возможность получения камер с прозрачными мембранными для оптического анализа продуктов реакции.

Для эффективного и быстрого переноса теплоты желательно иметь систему с низкой тепловой емкостью, которая обеспечивает быстрый нагрев и охлаждение жидкости. Миниатюризация приводит к тому, что термическая масса блока нагрева уменьшается. Реакционная камера подвешена на четырех брусках и таким образом термически изолирована от субстрата. Камера с находящейся в ней жидкостью может быть достаточно быстро нагрета с помощью микронагревателей, расположенных непосредственно под стенками камеры. Во время стадии охлаждения теплота передается из камеры к корпусу чипа, который имеет постоянную низкую температуру.

На рис. 11 представлена эквивалентная тепловая схема ПЦР микрореактора. Резистор R_1 и конденсатор C_1 характеризуют соответственно теплопередачу от стенок реактора на корпус кристалла и теплоемкость стенок реактора; резистор R_2 и конденсатор C_2 - теплопередачу от содержимого реактора во внешнюю среду и теплоемкость содержимого реактора; резистор R_3 - теплопередачу от нагревателя к содержимому реактора через стенки реактора. Из рассмотрения эквивалентной тепловой схемы следует, что для обеспечения возможности быстрого нагрева и охлаждения реактора сопротивление резистора R_3 и емкость конденсатора C_2 должны быть минимальны, а сопротивление резистора R_1 должно выбираться исходя из заданной скорости охлаждения и мощности источника тока.



Рис. 10. Конструкция ПЦР микрореактора

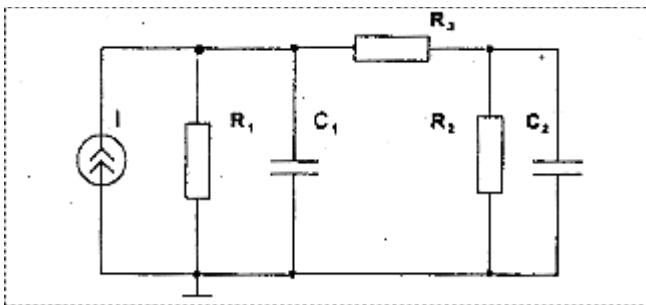


Рис. 11. Эквивалентная тепловая схема ПЦР микрореактора

В работе [10] нами была предложена конструкция микрореактора, в котором нагреватели и датчики температуры были выполнены из карбида кремния, превосходящего традиционный кремний по химической стойкости и теплопроводности. При объеме микрореактора 10 мкл скорость изменения температуры в интервале 20...100 °C может находиться на уровне 0,1...0,2 с. Достигаемая в микрореакторах локальность, а также времененная прецизионность воздействий повышает скорость и эффективность протекания процессов.

* * *

Теплофизические свойства и химическая инертность карбида кремния позволяют при переходе на микроуровень создавать уникальные элементы микросистемной техники на основе процессов поглощения и выделения теплоты. Благодаря миниатюризации исполнительных элементов датчиков снижается их собственное тепловое воздействие на измеряемые параметры, а также потребляемая мощность.

Кроме рассмотренных в данной статье типов приборов существует еще целый ряд устройств микросистемной техники, основанных на тепловых принципах работы – микроклапаны и микронасосы, микрореле, а также активаторы технологических процессов в локальных объемах.

Список литературы

1. Luchinin V.V., Korlyakov A.V. The Silicon Carbide-on-Insulator (SCOI) Structure as a Subject of High-Temperature Electronics // The Second European Conference on High Temperature Electronics (HITEN 97), September 1997, Manchester, England. 1997. P. 3-5.
2. Способ управления процессом получения эпитаксиальной полупроводниковой структуры. Патент России № 2132583 от 27.06.99. В.В. Лучинин, А.В. Корляков, С.В. Костромин.
3. Korlyakov A.V., Luchinin V.V., Nikitin I.V., Busch V., Liess H.D., Lademann J. Stable Integrated SiC-Based Microsystems: Heater/Temperature Sensor // 4-rd International Workshop on Thermal Investigations of ICS and Microstructures (TERMNIC 1998), September 1998, Cannes, France.
4. Тетельбаум И.М., Тетельбаум Я.И. Модели прямой аналогии. М.: Наука, 1979. 236с.
5. Никитин И.В. Новый активный датчик температуры и газовых потоков // Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (30.11.99-03.12.99) Тез. докл. СПб. 132с.
6. The Two Sensor Microflown / H.-E. De Bree, Leussink P., Korthorst T. M. Elwenspoek // Eurosensors X, Leuven, Belgium, 8-11 September, 1996. P. 1301-1304.
7. Неворотин А.И. Введение в лазерную хирургию. СПб, 2000.
8. Электрохирургический скальпель. Положительное решение от 07.05.99 п/з заявке № 98123393/14(025808) от 29.12.98. В.В. Лучинин, А.В. Корляков, И.В. Никитин, Х.Д. Лисе, Ю. Ладеманн, Ф. Буш.
9. Daniel J.H., Iqbal S., Millington R.B., Moore D.F., Lowe C.R., Leslie D.L., Lee M.A., Pearce M.J. Silicon microchambers for DNA amplification// Sensors and Actuators. A 71, 1998. P. 81-87.
10. Корляков А.В., Лучинин В.В. Перспективная элементная база микросистемной техники // Микросистемная техника. 1999. № 1. С.12-15.

УДК 621.3.084.2

В.Л. Будкин, канд. техн. наук, В.А. Паршин, канд. техн. наук, С.В. Прозоров, А.К. Саломатин, В.М. Соловьев, канд. техн. наук,
ОАО Раменское приборостроительное конструкторское бюро (РПКБ), г. Раменское, Московская область

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ

Приведены некоторые результаты работ, проводимых ОАО РПКБ в области создания кремниевых акселерометров и мультисенсорных датчиков. Представлены основные характеристики кремниевого компенсационного акселерометра и разомкнутого акселерометра с частотным выходом, а также некоторые результаты испытаний макетных образцов электростатического акселерометра и мультисенсорного датчика.

Введение

В области навигации и управления на основе кремниевой микротехнологии в настоящее время разрабатываются кремниевые датчики давления, акселерометры, датчики угловой скорости и мультисенсорные датчики. Мультисенсорные датчики представляют собой такие микромеханические устройства, которые позволяют одновременно измерять несколько параметров, например, линейные ускорения и угловую скорость. Использование кремниевых микромеханических акселерометров в мультисенсорном режиме дает возможность построения широкой гаммы приборов для систем навигации и управления различными объектами.

Компенсационный кремниевый акселерометр

В ОАО РПКБ работы в области использования кремниевой микромеханики в датчиках первичной информации для навигационных систем начались с 80-х годов. В своей статье мы опирались на наш большой опыт разработки обычных механических акселерометров и гироскопов. Акселерометры на нашем предприятии всегда строились по единой схеме одноосного маятникового компенсационного акселерометра. Применялись различные виды подвеса маятников (поплавковые, "сухие", на упругом подвесе), но общая схема оставалась неизменной. Поэтому первоначально была сделана попытка применить кремний в качестве конструкционного материала для подвеса маятника акселерометра. На предприятии был только опыт работы в области технологии изготовления гибридно-пленочных электронных блоков, для чего была создана соответствующая технологическая база. В этом направлении были достигнуты значительные успехи, особенно в создании вторичных источников электропитания, генераторов напряжения, термостабилизованных микро-

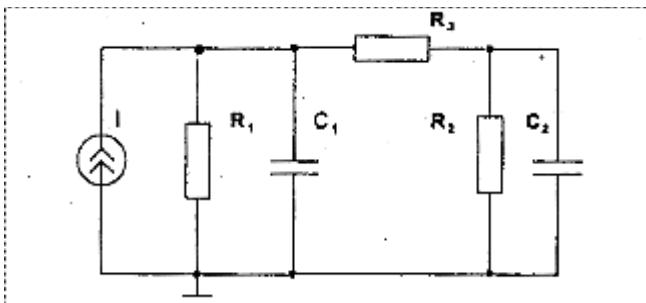


Рис. 11. Эквивалентная тепловая схема ПЦР микрореактора

В работе [10] нами была предложена конструкция микрореактора, в котором нагреватели и датчики температуры были выполнены из карбида кремния, превосходящего традиционный кремний по химической стойкости и теплопроводности. При объеме микрореактора 10 мкл скорость изменения температуры в интервале 20...100 °C может находиться на уровне 0,1...0,2 с. Достигаемая в микрореакторах локальность, а также времененная прецизионность воздействий повышает скорость и эффективность протекания процессов.

* * *

Теплофизические свойства и химическая инертность карбида кремния позволяют при переходе на микроуровень создавать уникальные элементы микросистемной техники на основе процессов поглощения и выделения теплоты. Благодаря миниатюризации исполнительных элементов датчиков снижается их собственное тепловое воздействие на измеряемые параметры, а также потребляемая мощность.

Кроме рассмотренных в данной статье типов приборов существует еще целый ряд устройств микросистемной техники, основанных на тепловых принципах работы – микроклапаны и микронасосы, микрореле, а также активаторы технологических процессов в локальных объемах.

Список литературы

1. Luchinin V.V., Korlyakov A.V. The Silicon Carbide-on-Insulator (SCOI) Structure as a Subject of High-Temperature Electronics // The Second European Conference on High Temperature Electronics (HITEN 97), September 1997, Manchester, England. 1997. P. 3-5.
2. Способ управления процессом получения эпитаксиальной полупроводниковой структуры. Патент России № 2132583 от 27.06.99. В.В. Лучинин, А.В. Корляков, С.В. Костромин.
3. Korlyakov A.V., Luchinin V.V., Nikitin I.V., Busch V., Liess H.D., Lademann J. Stable Integrated SiC-Based Microsystems: Heater/Temperature Sensor // 4-rd International Workshop on Thermal Investigations of ICS and Microstructures (TERMNIC 1998), September 1998, Cannes, France.
4. Тетельбаум И.М., Тетельбаум Я.И. Модели прямой аналогии. М.: Наука, 1979. 236с.
5. Никитин И.В. Новый активный датчик температуры и газовых потоков // Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (30.11.99-03.12.99) Тез. докл. СПб. 132с.
6. The Two Sensor Microflown / H.-E. De Bree, Leussink P., Korthorst T. M. Elwenspoek // Eurosensors X, Leuven, Belgium, 8-11 September, 1996. P. 1301-1304.
7. Неворотин А.И. Введение в лазерную хирургию. СПб, 2000.
8. Электрохирургический скальпель. Положительное решение от 07.05.99 п/з заявке № 98123393/14(025808) от 29.12.98. В.В. Лучинин, А.В. Корляков, И.В. Никитин, Х.Д. Лисе, Ю. Ладеманн, Ф. Буш.
9. Daniel J.H., Iqbal S., Millington R.B., Moore D.F., Lowe C.R., Leslie D.L., Lee M.A., Pearce M.J. Silicon microchambers for DNA amplification// Sensors and Actuators. A 71, 1998. P. 81-87.
10. Корляков А.В., Лучинин В.В. Перспективная элементная база микросистемной техники // Микросистемная техника. 1999. № 1. С.12-15.

УДК 621.3.084.2

В.Л. Будкин, канд. техн. наук, В.А. Паршин, канд. техн. наук, С.В. Прозоров, А.К. Саломатин, В.М. Соловьев, канд. техн. наук,
ОАО Раменское приборостроительное конструкторское бюро (РПКБ), г. Раменское, Московская область

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ

Приведены некоторые результаты работ, проводимых ОАО РПКБ в области создания кремниевых акселерометров и мультисенсорных датчиков. Представлены основные характеристики кремниевого компенсационного акселерометра и разомкнутого акселерометра с частотным выходом, а также некоторые результаты испытаний макетных образцов электростатического акселерометра и мультисенсорного датчика.

Введение

В области навигации и управления на основе кремниевой микротехнологии в настоящее время разрабатываются кремниевые датчики давления, акселерометры, датчики угловой скорости и мультисенсорные датчики. Мультисенсорные датчики представляют собой такие микромеханические устройства, которые позволяют одновременно измерять несколько параметров, например, линейные ускорения и угловую скорость. Использование кремниевых микромеханических акселерометров в мультисенсорном режиме дает возможность построения широкой гаммы приборов для систем навигации и управления различными объектами.

Компенсационный кремниевый акселерометр

В ОАО РПКБ работы в области использования кремниевой микромеханики в датчиках первичной информации для навигационных систем начались с 80-х годов. В своей статье мы опирались на наш большой опыт разработки обычных механических акселерометров и гироскопов. Акселерометры на нашем предприятии всегда строились по единой схеме одноосного маятникового компенсационного акселерометра. Применялись различные виды подвеса маятников (поплавковые, "сухие", на упругом подвесе), но общая схема оставалась неизменной. Поэтому первоначально была сделана попытка применить кремний в качестве конструкционного материала для подвеса маятника акселерометра. На предприятии был только опыт работы в области технологии изготовления гибридно-пленочных электронных блоков, для чего была создана соответствующая технологическая база. В этом направлении были достигнуты значительные успехи, особенно в создании вторичных источников электропитания, генераторов напряжения, термостабилизованных микро-

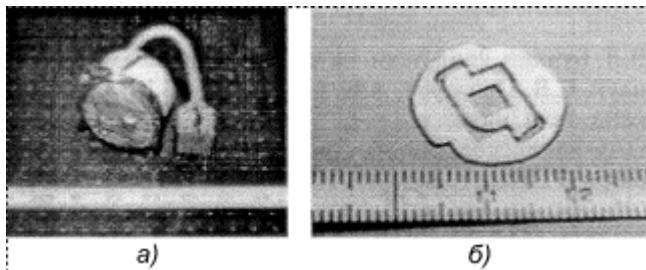


Рис. 1. Кремниевый маятник компенсационного акселерометра.
а – общий вид; б – конструкция

сборок с селективным подогревом отдельных частей топологического рисунка для различных систем инерциальной навигации. Но главное, был наработан большой технологический опыта области микрометрической технологии и фотошаблонов. Однако для изготовления кремниевых элементов акселерометров понадобилось разработать и внедрить еще ряд специальных технологий, в первую очередь – технологии сухого и влажного окисления, термодиффузии и разгонки примесей на заданную глубину в тело кремниевой пластины, глубокого контурного травления кремния и напыления электродов.

В результате проведенных работ был внедрен техпроцесс изготовления кремниевых чувствительных элементов и их упругих элементов. Эта большая подготовительная работа в освоении новых технологий привела к созданию целого ряда прецизионных кремниевых акселерометров компенсационного типа с магнитоэлектрической обратной связью для систем инерциальной навигации.

Общий вид акселерометра и конструкция кремниевого маятника одного из таких приборов представлены на рис. 1. Чувствительным элементом данного прибора является маятник диаметром 18 мм, выполненный из монокристаллического кремния, подвешенный на двух упругих перемычках, которые позволяют ему поворачиваться вокруг оси, лежащей в плоскости маятника. Маятник и перемычки изготовлены методами химического травления из одной пластины монокристаллического кремния толщиной 0,38 мм. Перемычки имеют размеры $1,3 \times 0,12 \times 0,0008$ мм. На маятнике установлена обмотка датчика момента и напылены электроды для датчика угла. Для подвода питания к катушкам датчика момента используются гибкие токоподводы. Кроме

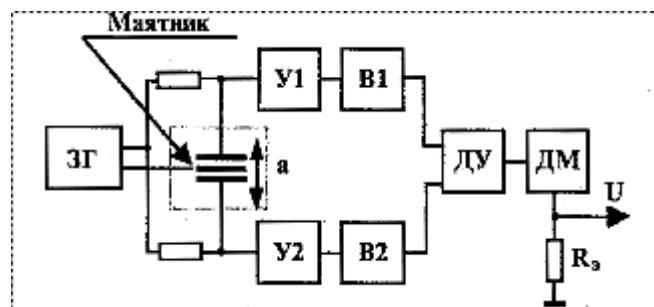


Рис. 2. Блок-схема маятникового акселерометра

того, для увеличения маятниковой на маятнике установлена дополнительная масса.

В качестве датчика угла в данном приборе используется датчик угла емкостного типа, который состоит из двух конденсаторов. В качестве одной общей обкладки используется маятник, а в качестве двух других – специальные электроды, напыленные на корпусе прибора. Зазор между маятником и электродами составляет 0,021 мм. Емкостной датчик угла идеально подходит для изделий кремниевой микромеханики по технологичности и порогу чувствительности, который составляет 10^{-11} мм [1].

В акселерометре используется датчик момента магнитоэлектрического типа. Кроме того, акселерометр имеетстроенную электронику обратной связи, изготовленную на основе гибридно-пленочной технологии. Акселерометр состоит (рис. 2) из задающего генератора ЗГ, двух усилителей У1 и У2, двух выпрямителей В1 и В2, дифференциального усилителя ДУ, датчика момента ДМ и эталонного сопротивления R_3 с которого снимается выходной сигнал U .

Испытания подтвердили высокие технические параметры акселерометров данного типа. Применение микроэлектронной технологии для изготовления маятника позволило обеспечить высокую точность и стабильность характеристик прибора. Такие акселерометры со встроенной электроникой выдерживают удары до 50 g и имеют следующие параметры:

- диапазон измеряемых ускорений ± 35 g
- масштабный коэффициент 1,3 MA/g
- нестабильность масштабного коэффициента 0,02%
- дрейф нулевого сигнала в течение одного часа < 10 μ g
- дрейф нулевого сигнала за время более одного часа 20 μ g
- порог чувствительности 0,5 μ g
- масса акселерометра 38 г

Данный тип акселерометра выпускается в нескольких модификациях (А-12, А-15, А-16 и А-17) в зависимости от конкретного применения. Эти акселерометры устанавливаются в карданные и бескарданные инерциальные системы разработки ОАО РПКБ. Конструкция акселерометра защищена рядом патентов [2, 3, 4, 5],

Разработка кремниевого маятника акселерометра разомкнутого типа

Основным недостатком описанного выше прибора является сложность конструкции чувствительного элемента. Была предпринята попытка существенно упростить конструкцию маятника акселерометра, в результате чего был разработан акселерометр разомкнутого типа с частотным выходом [6].

Общий вид и конструкция чувствительного элемента акселерометра представлены на рис. 3, а блок-схема электроники – на рис. 4. Датчик акселерометра состоит из двух маятников размерами $5 \times 3,8 \times 0,38$ мм, каждый из которых подвешен на трех упругих перемычках, одна размерами $1,2 \times 0,7 \times 0,010$ мм, а две других – размерами

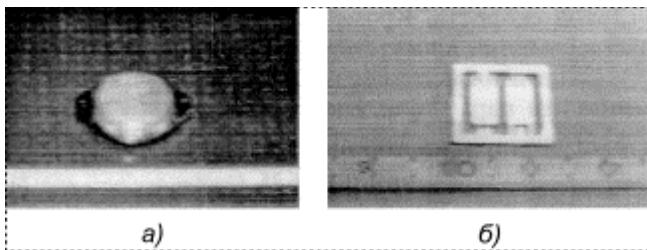


Рис. 3. Акселерометр с частотным выходом:
а – общий вид, б – конструкция чувствительного элемента

$0,6 \times 0,7 \times 0,010$ мм. Номинальный зазор составляет $0,030$ мм. Маятники образуют два конденсатора C_1 и C_2 с электродами, установленными на корпусе прибора, причем обкладки конденсаторов подсоединенны таким образом, что при действии ускорения зазор в одном конденсаторе увеличивается, а в другом – уменьшается. Каждый конденсатор включен в состав задающих контуров генераторов Γ_1 и Γ_2 . Соответственно частота одного генератора уменьшается, а другого увеличивается. Сигналы от каждого генератора складываются с помощью смесителя СМ, а разностная частота этих сигналов является выходным сигналом акселерометра. Такая схема акселерометра позволяет исключить дополнительные детали на маятнике и значительно упростить конструкцию чувствительного элемента прибора.

Зависимость выходного сигнала f акселерометра от действующего ускорения (рис. 5) имеет нелинейный характер.

При разработке данного типа акселерометра оказалось, что возникает целый ряд погрешностей, вызванных явлением самосинхронизации частот двух генераторов, довольно значительной зависимостью выходного сигнала акселерометра от питающего напряжения и температуры окружающей среды. Для уменьшения этих погрешностей пришлось вводить алгоритмическую компенсацию ошибок.

Акселерометр разомкнутого типа с частотным выходом АЦ-1 имеет следующие характеристики:

- диапазон измерения ± 40 г
- крутизна характеристики $1,5$ кГц/г
- точность $1,5\%$
- время готовности $0,2$ с
- напряжение питания 5 В

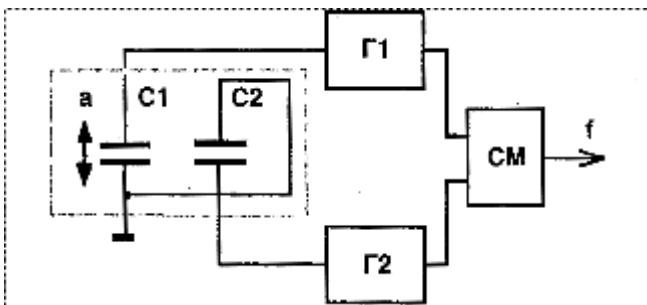


Рис. 4. Блок-схема разомкнутого акселерометра с частотным выходом

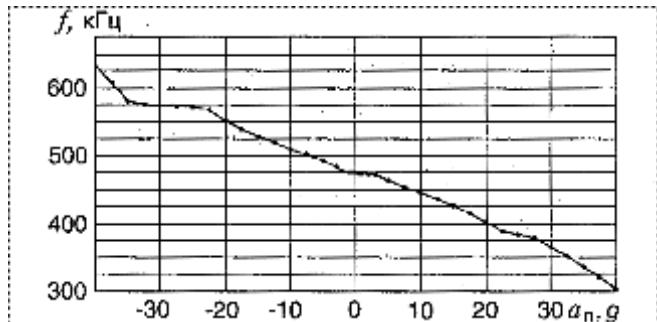


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала разомкнутого акселерометра от действующего ускорения

В настоящее время данный акселерометр используется в блоке датчиков ускорения системы катапультирования летчика.

Основными достоинствами этого акселерометра являются простота конструкции и, соответственно, малая стоимость. Поэтому он может найти применение для недорогих систем управления различными объектами, где не требуется высокая точность.

Кремниевый акселерометр с электростатической обратной связью

Дальнейшим развитием кремниевых акселерометров на нашем предприятии является разработка акселерометра компенсационного типа с электростатической обратной связью. Это позволяет повысить точность прибора и в то же время упростить конструкцию чувствительного элемента – маятника.

Конструкция акселерометра состоит из следующих элементов: плоского прямоугольного кремниевого маятника, подвешенного с одной стороны на упругих перемычках; напыленных на корпусе прибора электродов, которые одновременно выполняют роль электродов датчика угла; исполнительного элемента обратной связи.

На рис. 6 приведена блок-схема маятникового компенсационного акселерометра с электростатической обратной связью. Переменное напряжение от задающего генератора 3Γ подается в противофазе на неподвижные электроды акселерометра. Сигнал отклонения снимается с маятника и подается на предварительный усилитель PV , а затем – на демодулятор D , корректирующий фильтр $K\Phi$ и усилитель U . Кроме того, на маятник подается постоянное смещение U_0 для обеспечения работы электростатического подвеса. Выходное напряжение блока электроники U поступает на одну обкладку подвеса непосредственно, а на другую – через инвертор I .

Проведены испытания первых макетных образцов акселерометров. Маятник имеет размеры $4 \times 4 \times 0,38$ мм, толщина упругих перемычек 10 мкм, а воздушный зазор между маятником и статорными пластинами составляет $6-10$ мкм. Габаритные размеры чувствительного элемента акселерометра $9 \times 9 \times 2,5$ мм. Акселерометр имеет следующие параметры:

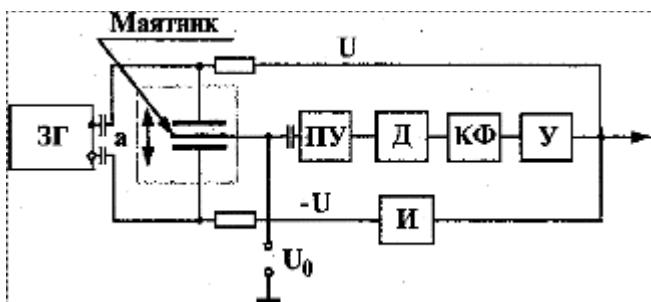


Рис. 6. Блок-схема маятникового компенсационного акселерометра с электростатической обратной связью

- диапазон измеряемых ускорений $\pm 10 \text{ g}$
- масштабный коэффициент $1,0 \text{ В/g}$
- напряжение смещения 15 В
- напряжение питания $\pm 15 \text{ В}$
- дрейф нулевого сигнала в течение одного часа $10 \mu\text{g}$

В настоящее время идет отработка технологии изготовления и разработка микросборки электроники.

Мультисенсорные датчики

Разрабатываемый электростатический акселерометр мы предполагаем использовать в качестве основного чувствительного элемента мультисенсорного датчика линейного ускорения и угловой скорости.

В настоящее время сформировалось два направления построения кремниевых датчиков угловой скорости. Первый – это создание вибрационных гироскопов. В таком приборе подвижная часть имеет две степени свободы. Создаются принудительные колебания чувствительного элемента относительно одной оси. При действии входной угловой скорости возникают колебания по второй оси, по амплитуде которых судят о входной угловой скорости. Для повышения чувствительности прибора необходимо повышать добротность подвеса. Однако при малых зазорах возникает эффект сдавливаемой пленки, который вносит очень большое демпфирование. Кроме того, необходимо повышать частоту резонансных колебаний, что возможно только при очень малых размерах чувствительного элемента. Это влечет за собой сложности реализации схем измерения выходного сигнала, так как схема измерения выходного сигнала – разомкнутого типа, со всеми вытекающими отсюда проблемами.

Второе направление – непосредственное измерение акселерометром кориолисового ускорения, возникающего при вибрации корпуса прибора в плоскости, перпендикулярной оси его чувствительности, и действии входной угловой скорости. Акселерометр при этом включен в режим обратной связи. В этом случае появляется возможность разделить чувствительный элемент и вибропривод. Поэтому нам представляется более перспективным второй путь построения датчиков

угловой скорости. Кроме того, в выходном сигнале акселерометров присутствует информация о линейном ускорении и появляется возможность измерять одновременно два параметра: угловую скорость и линейное ускорение.

В ОАО РПКБ сейчас проводятся исследования макетных образцов мультисенсорных датчиков на основе электростатических акселерометров. В качестве вибропривода блока акселерометров использован магнитоэлектрический вибратор и пластиначатый подвес на плоских бронзовых пружинах.

Проведенные испытания первых макетов образцов мультисенсорных датчиков показали следующие результаты (в град/с):

- | | |
|--|------|
| • максимальная входная скорость | 1500 |
| • постоянная составляющая дрейфа по угловой скорости | 10 |
| • порог чувствительности по угловой скорости | 0,1 |
| • случайный дрейф по угловой скорости | 0,1 |

Как показывают результаты испытаний, основная проблема в разработке мультисенсорных датчиков – это создание виброподвеса акселерометров, обеспечивающего заданные параметры вибрации по стабильности и уменьшение амплитуды вибрации по оси чувствительности акселерометров.

Результаты работ, проведенных в ОАО РПКБ, подтверждают перспективность применения кремниевой микротехнологии в датчиках для систем навигации и управления. Кремниевые акселерометры в настоящее время могут обеспечить все потребности заказчиков и даже найти новые применения, что может расширить сферу их использования. В области датчиков угловой скорости работа пока находится на начальном этапе развития. Необходимо проведение большого объема работ по отработке конструкций и технологии изготовления, а также по созданию алгоритмов обработки информации.

Список литературы

1. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин // Л.: Энергоатомиздат, 1983 г.
2. Патент № 2028000 (РФ). Компенсационный акселерометр / В.И. Баженов, И.В. Вдовенко, В.А. Рязанов, В.М. Соловьев // БИ 1995. №3.
3. Патент № 2028001 (РФ). Способ компенсации температурной погрешности крутизны характеристики акселерометра / В.И. Баженов, И.В. Вдовенко, В.А. Рязанов, В.М. Соловьев // БИ 1995. №3.
4. Патент № 2039994 (РФ). Компенсационный акселерометр / В.И. Баженов, И.В. Вдовенко, В.А. Рязанов, В.М. Соловьев // БИ 1995. №20.
5. Патент № 2051542 (РФ). Компенсационный акселерометр / В.И. Баженов, И.В. Вдовенко, В.А. Рязанов, В.М. Соловьев // БИ 1995. №36.
6. Патент № 2083989 (РФ). Акселерометр / В.И. Баженов, А.Н. Мухин, В.А. Рязанов, В.М. Соловьев // БИ 1997. № 19.

УДК 621.3

М.А. Жирнов, Центр инновационных технологий ОАО "НИИВС" Спектр"

МИРОКОСМИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ АППАРАТЫ НА ОСНОВЕ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Рассматриваются перспективы создания информационных микрокосмических аппаратов на основе микросистемной техники.

Идея микроминиатюризации космических аппаратов (КА) зреяла давно. Ведущие специалисты высказывали предположение, что если космические системы будут строиться на основе КА размерами с апельсин или футбольный мяч, то такие микроКА (МКА) будут недосягаемы для противодействия, резко возрастет их устойчивость и живучесть.

Микроэлектроника, интеллектуальные вычислительные устройства, микроэлектромеханика, новые материалы, покрытия, технологии, конструкторские решения, обеспечивающие малые размеры, создали потенциал для качественного скачка в развитии космической микроробототехники [1]. На рис. 1 представлен состав микроКА на базе МСТ. Намечается определенный технический и технологический прорыв. Ситуация с МКА в космонавтике напоминает ситуацию, когда А.Ф. Можайский и братья Райт начали создавать авиационную технику.

Представляется, что ряд космических проектов научного и прикладного содержания могут быть реализованы уже в ближайшие годы при достаточной финансовой поддержке и использовании экономически оправданных запусков (например, при "попутном" запуске МКА с основным КА одной ракетой-носителем либо при утилизации и конверсии стратегических ракет).

КА в микроисполнении массой порядка 100 кг, имеющий унифицированную космическую платформу и сменные модули специального назначения, например, обнаружители различных физических полей и соответствующих (по пропускной способности) радиолиний передачи добываемой информации, может иметь следующий состав.

1. Модуль ориентации и стабилизации, в который входят:

- микродвигатели коррекции положения микроКА на орбите;
- микродемпфирующее устройство;
- бесрасходовая система ориентации и стабилизации с использованием гравитационных и аэродинамических эффектов;
- система контроля на базе микропрограммиков.

2. Модуль служебных систем, в который входят:

- бортовой вычислительный комплекс на сверхбольших интегральных схемах;
- микрорадиолиния управления;
- микроисточники питания;
- микромодуль космической навигации;
- система терморегулирования пассивного типа с использованием системы тепловых труб;
- конструкция, построенная на использовании сотовых углепластовых панелей, являющихся одновременно силовым элементом, шасси размещения приборов и радиаторами системы терморегулирования.

МикроКА должны строиться на единой конструктивной и системной элементной базе.

Варианты модульного построения МКА на основе микросистемной техники представлены на рис. 2 (см. третью страницу обложки).

Развитие "микро- и малого космоса" на основе МСТ инициирует необходимость использования микро- и малых ракетных комплексов космического назначения, затраты на производство которых в настоящее время соизмеримы с затратами на производство КА. Прогнозируется использование ракет-носителей (РН) массой до 100 т вместо 300 т [2].

На начальном этапе создания МКА должен быть сформирован его облик, представляющий собой совокупность функциональных, конструктивных и других технических характеристик и решений, позволяющий предварительно оценить ожидаемую эффективность МКА. Основные требования предъявляются к информационным свойствам МКА, т.е. к полноте, достоверности, периодичности, виду и т.д. добываемой информации. С этой целью должны быть определены типы информационных источников, требуемая периодичность, содержание и форма получаемой и выдаваемой пользователям информации в процессе взаимодействия с микроКА. Рассматривая возможность создания МКА для дистанционного зондирования Земли

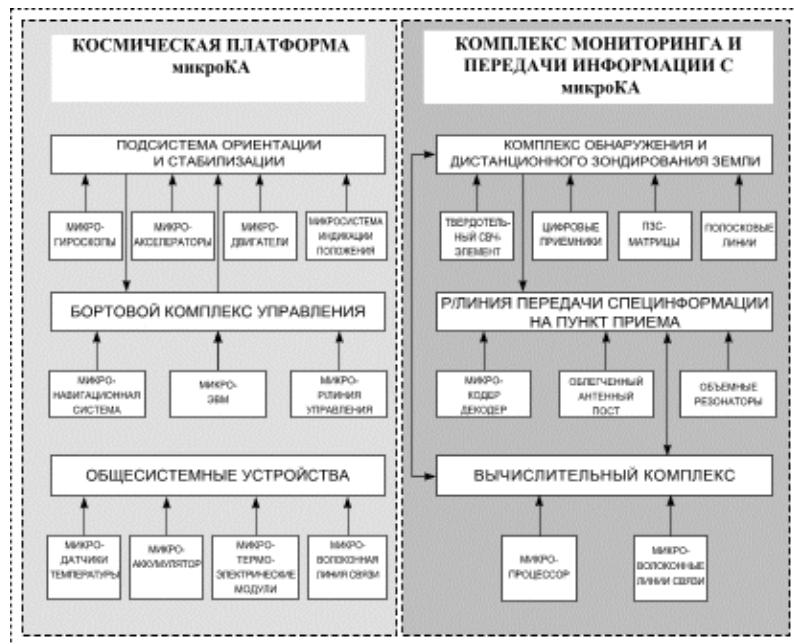


Рис. 1. Состав микроКА на базе МСТ

(мониторинга), необходимо иметь в виду следующие положения:

- состав и объем первичных данных, поступающих от МКА, должен соответствовать требованиям потребителя и обеспечивать решение его практических задач;
- для определения состава источников информации МКА необходимо также знать алгоритм комплексной обработки для получения достоверной и полной информации об изучаемых объектах на Земле.

На выбор типа МКА для дистанционного зондирования Земли, очевидно, будут влиять затраты средств, связанные с созданием информационных каналов, баз данных получаемой информации и технологического доступа к ним.

При создании информационных МКА должны решаться задачи не только сбора данных, но и создания разноплановой коммуникационной среды для обеспечения:

- управления собственно МКА и информационно-научным комплексом на борту МКА;
- получения телеметрической информации и информации оперативного контроля;
- получения мониторинговой информации с борта МКА.

На рис. 3 представлен вариант структурной схемы взаимодействия элементов космической системы (КС) на основе МКА различного типа.

Математическое и физическое моделирование облика

МКА на этапе, когда аппарата еще не существует, позволяет получить оценки эффективности различных вариантов МКА с использованием наборов средств МСТ при модульном построении.

При обосновании, моделировании и последующей разработке МКА могут быть приняты следующие основные принципы построения новой КС при их групповом, корпоративном использовании, а именно:

◆ экономически целесообразно осуществлять вывод одной РН одновременно нескольких МКА и расстановку их на орбите с разносом в несколько десятков - сотен тысяч километров;

◆ для мониторинга один (или несколько) из орбитальной группировки МКА может являться активным направленным излучателем электромагнитных волн в сантиметровом диапазоне, а другие, пассивные МКА, осуществляют:

- направленный прием отраженных сигналов от объектов, подстилающих поверхности и атмосферных образований;

- запоминание принятой совокупности шумов и полезных сигналов;

- брос добытой и запомненной информации на приемный пункт сбора и обработки информации при пролете над ним;

- в приемном пункте (ПП), обеспеченному аналитическим центром (средствами вычислительной техники и программно-алгоритмическим обеспечением), осуществляется обработка информации, поступающей одновременно от нескольких пассивных МКА и выделяется полезная информация об объектах;

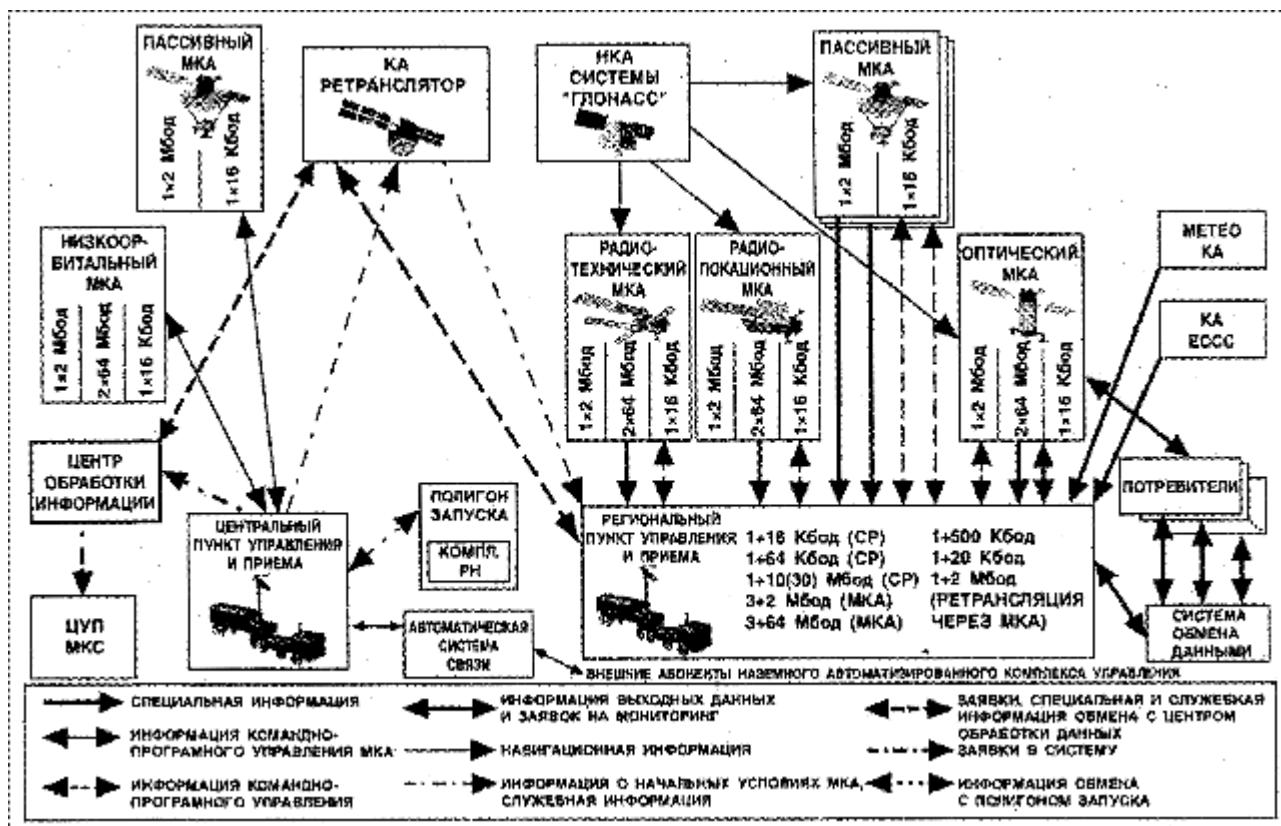


Рис. 3. Схема взаимодействия элементов космической системы на основе МКА различного типа

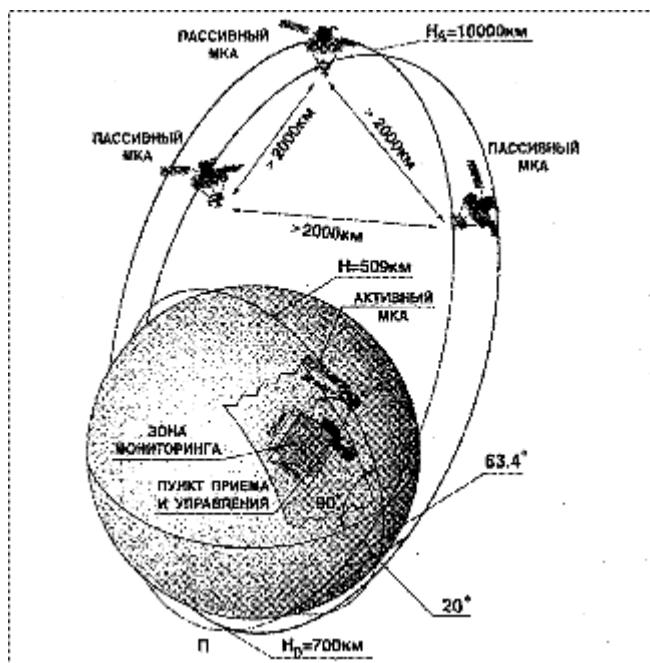


Рис. 4. Баллистическое построение орбитальной космической системы микроКА на среднеллиптических орбитах

◆ все МКА и ПП жестко синхронизированы по данным единой космической навигационной системы "Глонасс" или GPS. Приемные антенны пассивных МКА при пролете на ПП выполняют функции передающих антенн радиолиний выдачи информации;

◆ в качестве альтернативных способов обнаружения излучающих средств пассивным способом может рассматриваться как разностно-дальномерный способ (из трех пассивных МКА), так и триангуляционный (из двух пассивных МКА). Схематично баллистическое построение орбитальной космической системы МКА на среднеллиптических орбитах представлено на рис.4.

Таким образом, применение достижений МСТ позволяет получить новое качество КА, существенно изменить их облик и сферы применения. Космическая отрасль в максимальной степени аккумулирует последние достижения в микроэлектромеханике, электронике, специальных сверхлегких (углеродистых) материалах, в создании миниатюрных датчиков (например, волновых гироскопов, акселерометров), исполнительных микромеханизмов (генераторов, двигателей и т.д.). Подобные микроэлементы обеспечивают создание и вывод на орбиту малых (до 500 кг), микро- (до 100 кг), наново 10 кг) и пико- (до 1 кг) космических аппаратов легкими и дешевыми ракетами-носителями, например, выработавшими ресурс боевыми ракетами стратегического назначения, подлежащими утилизации, либо МКА с самолета-ракетоносца еще более легкой РН, либо "попутный" вывод с основным КА (при наличии запаса по массе).

Список литературы

1. Климов Д.М., Васильев А.А., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника 1999. № 1 С. 3-6
- 2 Рябова Н.В., Еськов Д.Н. Малые искусственные спутники в программах дистанционного зондирования Земли // Оптический журнал, 1998 № 1. С 4-19.

УДК 621.3.049.7.002

Т.М. Зимина, канд. техн. наук, В.В. Лучинин, д-р техн. наук, Е.В. Крапивина, аспирант, А.С. Ресин, аспирант Центр микротехнологии и диагностики, Санкт-Петербургский электротехнический университет

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА И ПРОБЛЕМЫ БИОМЕДИЦИНСКОГО АНАЛИЗА

Часть I. Основные классы микроаналитических систем

Обобщены материалы по аналитическим микросистемам для биомедицинского анализа. Рассматриваются технологии изготовления, особенности работы, конструкции функциональных компонентов и примеры их интеграции в аналитические микросистемы. Приведены данные по деятельности зарубежных компаний в области микроаналитических систем, представлены их промышленные образцы, а также примеры практического использования.

Развитие микросистемной техники, с одной стороны, и биоорганической химии и молекулярной генетики, с другой, привели к революционным изменениям в подходах к инструментальному биомедицинскому анализу, наблюдаемым в последние годы. Несмотря на то, что первые попытки соединить планарные технологии микроэлектроники с аналитической химией были осуществлены еще в семидесятые годы (например, "Стэнфордский газовый хроматограф", вошедший в учебники [1]), лишь в последние годы в США и Европе благодаря масштабным государственным и частным капиталовложениям (в основном фармакологических концернов и военных ведомств) это направление получило чрезвычайно высокие темпы развития.

Идея интеграции аналитических систем на чипе в ее современном виде ((μ-TAS, биологические микрочипы, капиллярные микрочипы) созрела в Ciba Geigy (Швейцария) [2] и Oak Ridge National Laboratory (США) [3]. Необходимость такой интеграции была инициирована трудностями создания прецизионных микронасосов и бесклапанных систем для высокоэффективной жидкостной хроматографии и высокими требованиями к детектированию при сверхвысокопроизводительном анализе.

К настоящему времени уже наметились тенденции в классификации аналитических микросистем. На наш взгляд, можно выделить три основные класса таких систем, которые приведены в таблице.

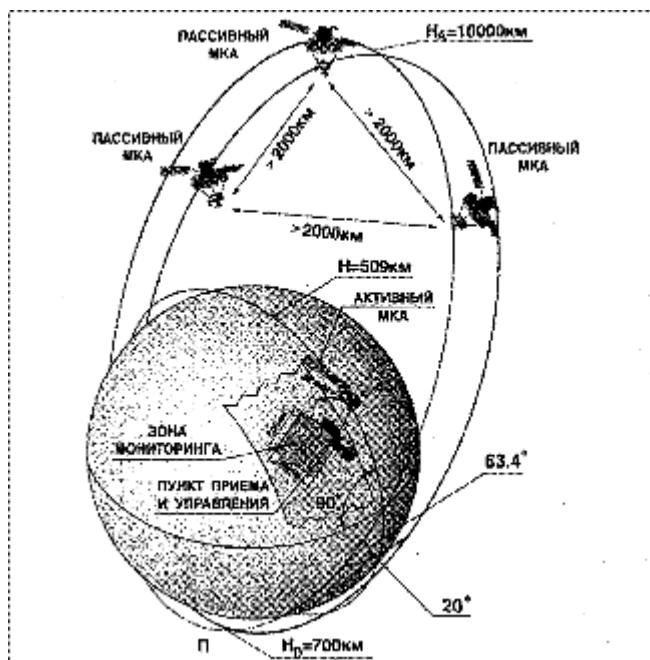


Рис. 4. Баллистическое построение орбитальной космической системы микроКА на среднеллиптических орбитах

- ♦ все МКА и ПП жестко синхронизированы по данным единой космической навигационной системы "Глонасс" или GPS. Приемные антенны пассивных МКА при пролете на ПП выполняют функции передающих антенн радиолиний выдачи информации;

- ♦ в качестве альтернативных способов обнаружения излучающих средств пассивным способом может рассматриваться как разностно-дальномерный способ (из трех пассивных МКА), так и триангуляционный (из двух пассивных МКА). Схематично баллистическое построение орбитальной космической системы МКА на среднеллиптических орбитах представлено на рис.4.

Таким образом, применение достижений МСТ позволяет получить новое качество КА, существенно изменить их облик и сферы применения. Космическая отрасль в максимальной степени аккумулирует последние достижения в микроэлектромеханике, электронике, специальных сверхлегких (углеродистых) материалах, в создании миниатюрных датчиков (например, волновых гироскопов, акселерометров), исполнительных микромеханизмов (генераторов, двигателей и т.д.). Подобные микроэлементы обеспечивают создание и вывод на орбиту малых (до 500 кг), микро- (до 100 кг), наново 10 кг) и пико- (до 1 кг) космических аппаратов легкими и дешевыми ракетами-носителями, например, выработавшими ресурс боевыми ракетами стратегического назначения, подлежащими утилизации, либо МКА с самолета-ракетоносца еще более легкой РН, либо "попутный" вывод с основным КА (при наличии запаса по массе).

Список литературы

1. Климов Д.М., Васильев А.А., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника 1999. № 1 С. 3-6
- 2 Рябова Н.В., Еськов Д.Н. Малые искусственные спутники в программах дистанционного зондирования Земли // Оптический журнал, 1998 № 1. С 4-19.

УДК 621.3.049.7.002

Т.М. Зимина, канд. техн. наук, В.В. Лучинин, д-р техн. наук, Е.В. Крапивина, аспирант, А.С. Ресин, аспирант Центр микротехнологии и диагностики, Санкт-Петербургский электротехнический университет

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА И ПРОБЛЕМЫ БИОМЕДИЦИНСКОГО АНАЛИЗА

Часть I. Основные классы микроаналитических систем

Обобщены материалы по аналитическим микросистемам для биомедицинского анализа. Рассматриваются технологии изготовления, особенности работы, конструкции функциональных компонентов и примеры их интеграции в аналитические микросистемы. Приведены данные по деятельности зарубежных компаний в области микроаналитических систем, представлены их промышленные образцы, а также примеры практического использования.

Развитие микросистемной техники, с одной стороны, и биоорганической химии и молекулярной генетики, с другой, привели к революционным изменениям в подходах к инструментальному биомедицинскому анализу, наблюдаемым в последние годы. Несмотря на то, что первые попытки соединить планарные технологии микроэлектроники с аналитической химией были осуществлены еще в семидесятые годы (например, "Стэнфордский газовый хроматограф", вошедший в учебники [1]), лишь в последние годы в США и Европе благодаря масштабным государственным и частным капиталовложениям (в основном фармакологических концернов и военных ведомств) это направление получило чрезвычайно высокие темпы развития.

Идея интеграции аналитических систем на чипе в ее современном виде ((μ-TAS, биологические микрочипы, капиллярные микрочипы) созрела в Ciba Geigy (Швейцария) [2] и Oak Ridge National Laboratory (США) [3]. Необходимость такой интеграции была инициирована трудностями создания прецизионных микронасосов и бесклапанных систем для высокоэффективной жидкостной хроматографии и высокими требованиями к детектированию при сверхвысокопроизводительном анализе.

К настоящему времени уже наметились тенденции в классификации аналитических микросистем. На наш взгляд, можно выделить три основные класса таких систем, которые приведены в таблице.

Основные классы микроаналитических систем

Тип	Класс	Основные технологии
1	Матричные микрочипы (генные, гибридизационные чипы)	1. Адресный синтез цепных молекул-мишеней с помощью фотошаблонов. 2. Фотоинициирование реакций 3 Гибридизация (распознавание на молекулярном уровне)
2	Капиллярные микрочипы (в том числе с функциональными элементами, например, ПЦР реакторами, химическими реакторами)	1. Капиллярный электроосмотический транспорт 2. Микрогидравлика. 3. Микромеханика 4. Оптоэлектроника.
3	Сверхвысокопроизводительные компьютеризированные скоростные системы адресной доставки проб - платформы	1 Электроосмотический транспорт. 2. Микрогидравлика

В статье приводятся некоторые данные по матричным микрочипам (см. таблицу – тип 1) и подробнее рассматриваются капиллярные микрочипы (тип 2), так как эта область более соответствует направлению работ авторов данной статьи. Что касается третьего типа микросистем – сверхвысокопроизводительных устройств доставки, то в литературе имеется относительно мало данных по таким системам. Однако, по мнению авторов, данное направление достаточно перспективно и в настоящее время интенсивно развивается в США фирмой Aurora Biosciences Corporaiton ввиду потребности в автоматизации сверхвысокопроизводительного анализа.

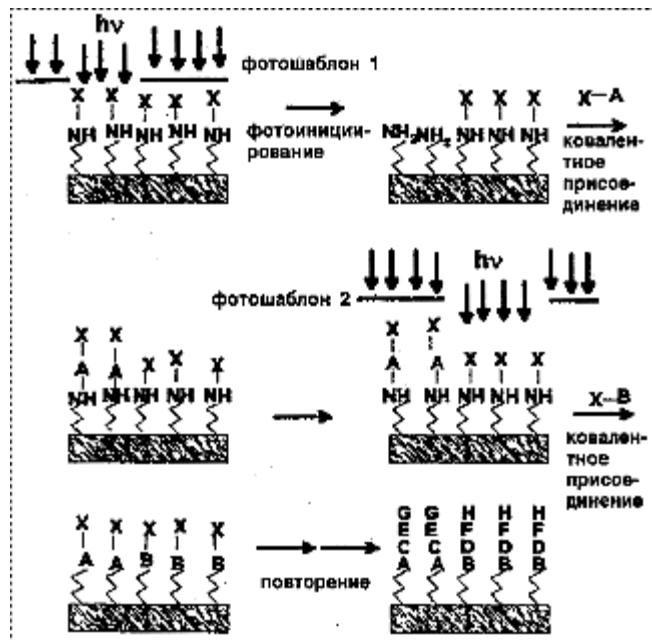


Рис. 1. Схема фотолитографического адресного параллельного химического синтеза [4]

Матричные (гибридизационные) микрочипы

Данный принцип анализа предложен в работе Fodor et al. [4], где продемонстрированы новые возможности соединения трех известных технологий: фотолитографии, УФ-инициируемого синтеза на твердом носителе и молекулярной гибридизации (распознавания). В результате предложенной в [4] концепции на несколько порядков повысилась производительность генного анализа и возникла новая индустрия – геномика [5].

Принцип изготовления гибридизационных микрочипов схематически представлен на рис. 1 [4]. В начальной стадии к субстрату присоединены аминогруппы, блокированные фоточувствительными защитными группами . Освещение через определенный фотошаблон 1 участков субстрата приводит к фотоинициированию, после чего аминогруппы готовы к химическому присоединению блока A с защитной группой . Затем фотошаблон 2 используется для фотоинициирования другого участка субстрата. После этого присоединяется блок B с защитной группой . После повторения подобных циклов фотоинициирования и химического присоединения получается матрица с цепочками определенной химической последовательности, например олигонуклеотиды, имеющими адрес. Таким образом, структура конечной матрицы, полученной путем одновременного адресного синтеза большого числа соединений, зависит от топологии и последовательности использования фотошаблонов, а также последовательности реагентов. При 50-микрометровой площадке на одном квадратном сантиметре может быть синтезировано 40 000 соединений, а при использовании LIGA технологий возможно получение матрицы с плотностью 10^{10} на квадратный сантиметр.

Впрочем использование фотолитографии – это не единственный подход к реализации параллельного синтеза. Например, можно разделять реагенты путем добавления их в различные микрореакторы. Так, 96 соединений было получено путем опускания кончиков иглы в различные растворы, помещенные в микропробирки на стандартной кассете для микротитрования [4]. В России подобный подход предложен А.Д. Мирзабековым с соавторами, разработавшими принцип гибридизации олигонуклеотидов для определения последовательности ДНК и топологическое двумерное кодирование матриц, в которых координата соответствовала олигонуклеотиду определенной последовательности [7]. В данном случае вещества-маркеры вносились механически в микропробирки с помощью микродозатора, а параллельный синтез с помощью фотолитографии не применялся.

Методы матричных чипов с топологическим кодированием могут использоваться для изучения последовательностей путем гибридизации с их фрагментами, иммобилизованными на матрице. Результат прочитывается как система светящихся точек. Метод такого изучения последовательностей называется SBH (sequencing by hybridisation – сканирование с помощью гибридизации).

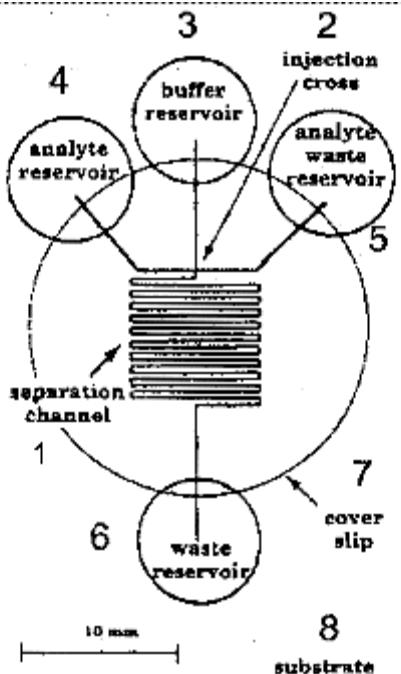


Рис. 2. Схема стеклянного чипа для капиллярного электрофореза:
1 – сепарационный канал в виде "серпантин"; 2 – инжекционный крест; 3 – резервуар для буферного раствора; 4 – резервуар с образцом; 5 – слив ненужного образца; 6 – слив буферного раствора и проанализированного образца; 7 – покровное стекло, – стеклянный субстрат [8]

Капиллярные микрочипы

Перейдем к капиллярным аналитическим микросистемам (КАМС). Эти системы представляют собой микрореализацию высокоэффективного капиллярного электрофореза (ВЭКЭ) и капиллярной электрохроматографии (КЭХ) с интегрированными элементами жидкостной микрокапиллярной логики, микрокомпонентами пробоподготовки и дериватизации, миниатюрными оптоэлектронными устройствами регистрации. Перспективное развитие КАМС видится в создании на основе достижений микросистемной техники портативных приборов с одноразовыми капиллярными чипами и сменными снаряженными реагентами картриджами. На рис. 2 представлена топология капиллярного микрочипа для электрофореза [8], изготовленного из предметного стекла для микроскопии размером 50×25 мм и покрытого для герметизации каналов круглым покровным стеклом диаметром 22 мм. Каналы получены стандартными процедурами фотолитографии, включающими жидкостное травление.

Особенности функционирования капиллярных микрочипов (аналитических микросистем)

Основой функционирования КАМС является течение жидкости (или газа) в капилляре и, в первую очередь, за счет электрохимических эффектов. Теоретические положения электрохимической миграции в капилляре

изложены в многочисленных работах, в том числе в [9, 10]. Известно, что применение электрофоретического разделения в кварцевых капиллярах позволило существенно повысить разрешение по сравнению с хроматографическими системами [9, 11]. Однако в системах КАМС с высокой степенью пространственной интеграции капилляров появляются методические проблемы, связанные с дополнительным геометрическим вкладом в дисперсию зоны. Кроме того, важно оптимизировать геометрию и процедуру инъекции пробы и найти оптимальные размеры каналов, поскольку в реализации систем КАМС важной задачей является сверхскоростное разделение, требующее уменьшения поперечных размеров канала и его длины.

Геометрическая дисперсия, связанная с движением зон в каналах сложной формы, пропорциональна отношению времени поперечной диффузии образца ко времени продвижения зоны, совершающей поворот [12]. Одномерная модель, основанная на расчете разницы миграционных длин, силы поля и поперечного дисперсионного эффекта, достаточно точно описывает экспериментальные данные. Повороты потока в каналах микрочипа приводят к уменьшению сепарационной эффективности по сравнению с прямыми каналами такой же сепарационной длины, особенно для молекул с малым коэффициентом диффузии. Дисперсия при движении зоны образца в искривленных каналах $\frac{2}{t_{rn}}$ может быть представлена выражением [12]

$$\frac{2}{t_{rn}} = (\Delta)^2 / \quad = [2f(1 - \exp(-t_D/t_r))]^2 / \quad , \quad (1)$$

где Δ – разность путей молекул образца у наружной и внутренней стенок изогнутого капилляра; f – постоянная, определяемая формой входной функции, которая создает избыточную дисперсию; f – угол поворота в радианах; t_r – ширина верхнего основания трапеции сегмента; t_D – время поперечной диффузии образца; t_r – время движения зоны образца в искривленном участке капилляра.

Глубина канала также влияет на разрешение и ширину зон [13]. Это видно на примере электрохроматографии нейтральных красителей (кумарин C440, C450, C460, C480) в полом капилляре, выполненном травлением в стеклянной подложке и поверхностно обработанном октадецилсиланом. При варировании глубины каналов от 10,2 до 2,9 мкм вид зависимости так называемой высоты теоретической тарелки (величины, связанной с дисперсией зоны) от линейной скорости потока в капилляре принципиально изменяется. Минимум этих зависимостей (рис. 3) смещается в сторону более высоких скоростей потока и меньших глубин канала [13]. Уравнение Голея, описывающее этот процесс, совпадает с экспериментальными данными:

$$H(\) = \frac{2D}{D_s} + f(k) \frac{d_c^2}{D} + f_s(k) \frac{d_f^2}{D_s} \quad , \quad (2)$$

где D , D_s – коэффициенты диффузии в подвижной и стационарной фазах соответственно; d_c – глубина канала; d_f – толщина стационарной фазы; k – линейная

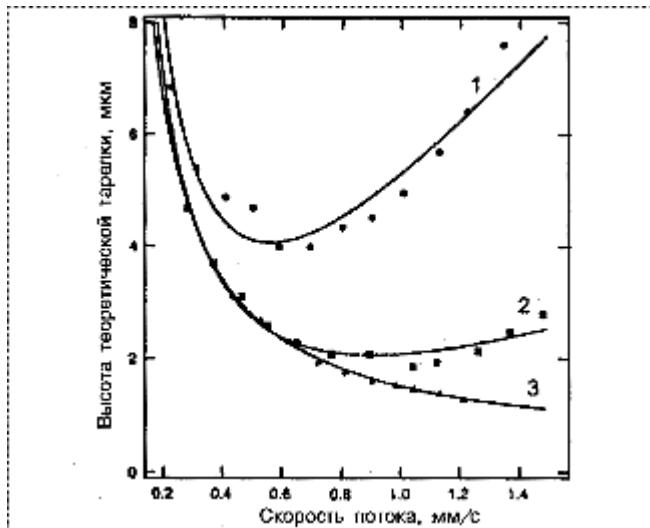


Рис. 3. Зависимость высоты теоретической тарелки (дисперсии зоны) от линейной скорости потока при электрохроматографии в полом капилляре, обработанном октадецилсиленом, выполненной на планарных стеклянных микрочипах с различной глубиной канала:
1 – 8,7 мкм; 2 – 4,7 мкм; 3 – 2,9 мкм. Подвижная фаза состоит из боратного буферного раствора (10 ммол/л, pH 8,4) с добавлением 30% об. ацетонитрила. Образец – кумарин C460 [13]

скорость подвижной фазы; $f(k)$, $f_s(k)$ – функции фактора емкости вещества (k) в подвижной и стационарной фазах соответственно.

Полученный в [13] результат означает, что скорость анализа может быть увеличена при сохранении эффективности.

Важным фактором повышения эффективности разделения является минимизация объема пробы, в том числе – с использованием различных приемов, таких как электрохимическое сжатие зоны при ее вводе в капилляр (стэкинг), использование инжекционного креста с образованием малого объема пробы в области пересечения (точечный ввод) или использование электрохимических свойств вместе с коммутацией

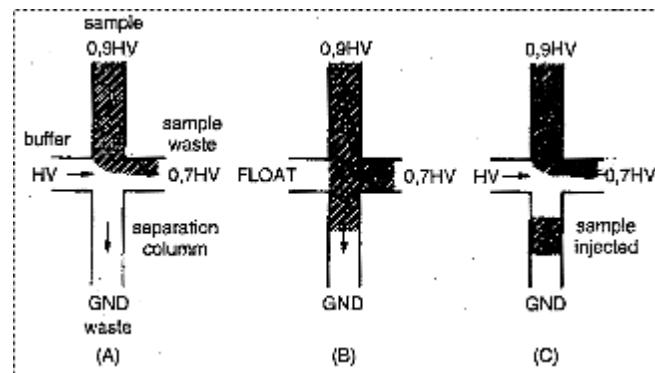


Рис. 4. Схема ввода пробы в капиллярный аналитический чип с помощью запирающего потенциала:
A – стабильный поток образца из резервуара образца в резервуар слива; B – момент отключения высокого напряжения (запирающего потенциала) в левом канале (поток образца затекает в разделительный канал); C – восстановление высокого напряжения (запирающего потенциала), отделение зоны образца и ее миграция в разделительный канал [14]

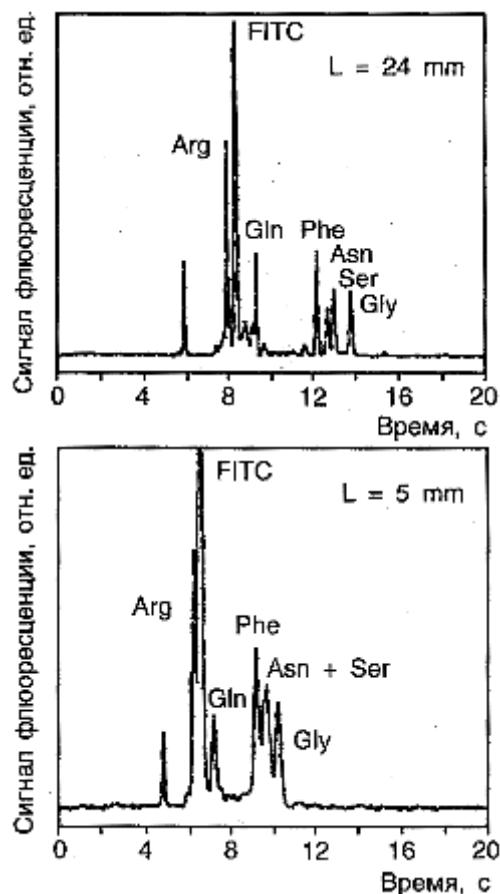


Рис. 5. Электрофореграммы смеси аминокислот меченых флуоресценцииизотиоцианатом (ФИТЦ), полученные в капиллярах длиной 5 и 24 мм. Напряженность электрического поля 1060 В/см. Концентрация каждой аминокислоты в пробе 10 ммол/л. Буферный раствор (pН 9,0) содержит борную кислоту (20 ммол/л) и три-гидроксиметиламинометан (100 ммол/л) [14]

высоких напряжений для импульсного впрыскивания образца при отключении запирающего потенциала [14], а также их сочетание. Например, метод ввода пробы (рис. 4) сравнивается в [14] с методом точечного ввода, когда образец движется через инжекционный крест перпендикулярно разделительному каналу, а в момент ввода пробы узкая зона из пересечения каналов направляется в разделительный канал включением высокого напряжения на линии буфер – слив. При сравнении метода запирающего потенциала в сочетании со стэкингом и точечного ввода последний имеет преимущества с точки зрения эффективности разделения (эффективность при стэкинге составляет только 60 – 74 % эффективности при точечном вводе). Однако с точки зрения пределов детектирования, стэкинг имеет явные преимущества, обеспечивая увеличение эффективности анализа до 10 раз. Данные получены с помощью кварцевого чипа с разделительным капилляром длиной 67 мм, размещенным на площади 7×10 мм в виде спиральника для разделения дэнзилированных аминокислот. Наиболее эффективные разделения осуществлялись

за 15 с с эффективностью 40 000 теоретических тарелок (рис. 5). В [14] проведена оценка всех вкладов в высоту теоретической тарелки H согласно уравнению

$$H = \frac{\frac{2}{inj}}{16L_{sep}} + \frac{\frac{2}{det}}{16L_{sep}} + \frac{2D}{sep} + \frac{n(dc)^2}{12L_{sep}}, \quad (3)$$

где inj – длина зоны пробы; det – длина окна детектора; L_{sep} – длина разделительного канала; D – коэффициент диффузии; n – электрофоретическая подвижность; sep – напряженность электрического поля; n – число поворотов; dc – разность длины линии по внешнему и внутреннему контуру капилляра на изгибе.

Эффективность разделения при изменении напряженности электрического поля определялась экспериментально и сравнивалась с уравнением (3), в котором влияние размеров зоны пробы, геометрии капилляров и размеров окна детектора является постоянным. В эксперименте наблюдалось уменьшение дисперсии пика при увеличении напряженности электрического поля до 1200 В/см. При этом в минимальном значении дисперсии вклад геометрии капилляра составил 30 %, т.е. величину, близкую к теоретической.

Ввод пробы в чип-электрофорезе может осуществляться также с помощью системы двойного Т-образного инжектора [15]. Эта система позволяет вводить очень малые объемы пробы (50...500 пл), определенные геометрически. Ширина канала и симметрия инжектора имеют первостепенное значение для хорошей производительности. Отталкивание избытка пробы в боковые каналы может эффективно осуществляться только тогда, когда боковые каналы имеют низкое сопротивление потоку. Различие концентрации ионов в образце и в рабочем буферном растворе может вызвать плохую повторяемость (вариации значений от 1,5 до 10 раз) ввода пробы как по форме зоны, так и по ее размеру. Хотя точное регулирование напряжений, приложенных к различным терминалам, до некоторой степени помогает регулировать форму пробы, тем не менее, вариации могут достигать 30 %. Поэтому стэкинг следует применять в КАМС с большой осторожностью.

Организация постколоночных реакций на чипах является одним из основных направлений разработки архитектуры многофункциональных аналитических устройств. В отличие от хроматографии, где постколоночные реакторы работают после завершения разделения, в электрофоретических устройствах разделение компонентов пробы происходит и после проведения реакции благодаря градиенту напряженности электрического поля. Такая реакция должна быть быстрой, с эффективным перемешиванием компонентов, чтобы избежать уширения зон из-за их различной электрофоретической подвижности. В [16] рассматриваются вопросы влияния геометрии реакционных устройств на чипах на эффективность. При сравнении различных типов постколоночных реакторов отмечено, что некоторые конструкции реакторов позволяют получить лишь довольно низкие эффективности (несколько тысяч теоретических тарелок). При этом варьирование режима

потоков не дает повышения эффективности, поэтому представляет интерес изучить влияние геометрии постколоночных реакторов на эффективность анализа. Так, при использовании Т-образной камеры достигается эффективность только 2000–4000 теоретических тарелок (т. т.) при условиях, когда должно быть 50000 т. т. или более [16]. Наблюдение точки смешения показало, что при смешивании реагент вытягивается в сторону по течению из бокового канала, так что реагент (ортофталевый альдегид) должен диффундировать поперек всего смесительного канала, чтобы полностью перемешаться с зоной образца. Предложены более эффективные конструкции капилляров, при которых вещества встречаются "головами" так, что каждое из них занимает примерно половину канала [16]. В данном случае используется диффузионное перемешивание. Обнаружено, что ширина каналов играет такую же важную роль, как и угол пересечения каналов. Кроме того, необходимо учитывать химию процесса смешения образца и реагентов. Так, например, даже небольшое различие в pH реагентов дает непредсказуемое течение. Получены значения эффективности 20000 т. т.

Недавно продемонстрирован выдающийся результат по высокоскоростному разделению на чипе [18]. Достигнуто разделение двухкомпонентной смеси за 0,8 мс при напряженности электрического поля 53 В/см в капилляре длинной сепарационного канала 200 мкм. Разделены родамин и дихлорфлюoresцеин. Высота тарелки составила $(1,1 \pm 0,3$ мкм), при этом высота теоретической тарелки увеличивалась при повышении напряженности поля. Предполагается, что это возрастание высоты теоретической тарелки происходит благодаря выделению Джоулевой теплоты, которую можно оценить по формуле

$$H_t = \frac{4,4 \cdot 10^{-7} a^6 \frac{5}{sep} \lambda^2 c^2}{Dk^2} \frac{av}{}, \quad (4)$$

где a – половина глубины канала (3,5 мкм); sep – напряженность электрического поля в сепарационном канале; λ – молярная электропроводность буфера ($0,0332 \text{ м}^2/\text{Ом}\cdot\text{моль}$)); c – концентрация буфера (1 ммоль/л); D – коэффициент диффузии ($3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$); k – коэффициент теплопроводности буфера (0,6 Вт/(м·К)).

Демонстрация субмиллисекундного разделения является чрезвычайно многообещающей для применения в сверхвысокопроизводительных системах разработки фармацевтических препаратов, изучения кинетики миллисекундных химических и биохимических процессов.

В КАМС могут применяться такие же системы детектирования, как в капиллярном зонном электрофорезе, т.е. фотометрические, флюориметрические, лазерно-индуцированные флюориметрические, электрохимические. Однако наряду с этими системами, используя возможности планарных технологий и

гибкость архитектуры капиллярных микрочипов, можно существенно разнообразить и миниатюризировать детектирующие системы. Эти вопросы авторы планируют подробнее рассмотреть в будущих публикациях. Отметим только, что в настоящее время распространение получили детекторы с применением реагентов для визуализации компонентов [16, 19]. Например, в [19] хемилюминесцентное детектирование с помощью пероксидазы из хрена катализирует реакцию люминола с перекисью водорода для детектирования в чип-электрофорезе. Такая система удобна тем, что не требует источника света. Описанное в [19] устройство изготовлено из стекла с каналами глубиной 10 мкм и с алюминиевым зеркалом, встроенным в стенку чипа для усиления сбора света. Чувствительность детектирования по концентрации при отношении сигнала к шуму, равном 3, для пробы в 1 нл составила 35 нмоль/л.

Список литературы

1. Terry S.C., Jerman J.H., Angell J.B. // IEEE Trans. Electron Devices, 1979. V. 26. P. 1880.
2. Harrison D.J., Manz A., Fan Z. // Anal. Chem. 1992. V. 64. P. 1926-1932.
3. Jacobson S.C., Hergenroeder R., Kounty L.B. // Anal. Chem. 1994. V. 66. P. 1114-1118.
4. Fodor S., Read J.L., Perring M.C. // Science. 1991. V. 251. P. 767-773.
5. Hacia J.C., Makalovski W., Edgemon K. // Nature Genetics. 1998. V. 18. P. 155-158.
6. Cronin M.T., Fucini R.V., Kirn S.V. // Human Mutation, 1996. V. 7. P. 244-255.
7. Храпко К., Шик В., Мирзабеков А. // Доклады Академии наук СССР, 1988. Т 303. С. 1508-1511.
8. Jacobson S.C., Hergenroeder R., Kounty L.B., Warmack R.J., Ramsey J.M. // Anal. Chem. 1994. V. 66. P. 1107-1113.
9. Mikkers F., Everaerts F., Verheggen T. // J. Chromatogr. 1979. V. 169. P. 1.
10. Li S.F.Y. // Capillary Electrophoresis principles. 1992. Elsevier. 586 p. P. 6-28.
11. Jorgenson J.W., Lukas K.D. // Anal. Chem. 1981. V. 53. P. 1298.
12. Culbertson Ch. T., Jacobson S.C., Ramsey J.M. // Anal. Chem. 1998. V. 70. P. 3781-3789.
13. Kutter J., Jacobson S.C., Matsumura N. // Anal. Chem. V. 70. P. 3291-3297.
14. Jacobson S.C., Ramsey J.M. // Electrophoresis. 1995. V. 16. P. 481-486.
15. Effenhauser C.S., Manz A., Widmer H.M. // Anal. Chem. 1993. V. 65. P. 2637-2642.
16. Schults-Lockyear L.L., Colyer C.L., Fan Z.H. // Electrophoresis. 1999. V. 20. P. 529-538.
17. Fluri K., Fitzpatrick G., Chiem N., Harrison D.J. // Anal. Chem. 1996. V. 68. P. 4285-4290.
18. Jacobson S.C., Culbertson C.T., Daler J.E. // Anal. Chem. 1998. V. 70. P. 3476-3480.
19. Jacobson S.C., Michael J. // Anal. Chem. V. 68. P. 720-723.

(Продолжение в следующем номере.)

УДК 678.7

Е.П. Гребенников,
ОАО ЦНИТИ "Техномаш"

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАКТЕРИОРОДОПСИНСОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

Часть I

Исследуются бактериородопсинсодержащие полимерные пленки в целях организации на их основе процессов обработки информации. Базовые процессы преобразования информации бактериородопсинсодержащими средами определяются обратимыми свето-зависящими изменениями показателей поглощения и преломления. Рассматриваются оптико-физические, технологические и конструкционные свойства бактериородопсинсодержащих полимерных пленок.

Введение

В настоящее время в области информатики бурное развитие переживают нейросетевые технологии обработки информации. Исходные идеи нейрокомпьютинга, сформулированные Мак-Каллоком и Питсом еще в 40-е годы, предполагали построение вычислительных устройств на основе сетей нейроподобных элементов по аналогии с биологическими нейронными структурами. Однако в отличие от получивших широчайшее распространение цифровых компьютеров, основанных на парадигме фон-Неймана, нейрокомпьютеры ожидали рождения своей элементной базы очень долго. Технологии микроэлектроники ориентировались на обслуживание архитектуры фон-неймановских компьютеров, а работы в области нейрокомпьютинга носили теоретический характер и были направлены на создание пакетов программ, эмулирующих работу нейронных сетей. За последние несколько лет ситуация коренным образом изменилась. Созданием элементной базы нейрокомпьютеров усиленно занимаются не только страны, лидирующие в сфере производства электроники, но и страны, пока еще отстающие, рассчитывающие занять новые позиции на рынке информационных технологий.

Государственные программы США, Японии, стран Западной Европы на период 1989-1997 гг. предусматривали создание нейрокомпьютеров и на их основе интеллектуальных робототехнических систем, способных к автономному обучению и последующей успешной работе в сложных условиях внешней среды.

Ряд частных фирм, например Фудзицу, Хитачи, Нихон денки и другие (Япония), также объединили усилия в этой области.

В 1993 г. в Японии принята десятилетняя программа в целях создания аддитивной эволюционирующей ЭВМ на основе нейросетевых подходов [1].

гибкость архитектуры капиллярных микрочипов, можно существенно разнообразить и миниатюризировать детектирующие системы. Эти вопросы авторы планируют подробнее рассмотреть в будущих публикациях. Отметим только, что в настоящее время распространение получили детекторы с применением реагентов для визуализации компонентов [16, 19]. Например, в [19] хемилюминесцентное детектирование с помощью пероксидазы из хрена катализирует реакцию люминола с перекисью водорода для детектирования в чип-электрофорезе. Такая система удобна тем, что не требует источника света. Описанное в [19] устройство изготовлено из стекла с каналами глубиной 10 мкм и с алюминиевым зеркалом, встроенным в стенку чипа для усиления сбора света. Чувствительность детектирования по концентрации при отношении сигнала к шуму, равном 3, для пробы в 1 нл составила 35 нмоль/л.

Список литературы

1. Terry S.C., Jerman J.H., Angell J.B. // IEEE Trans. Electron Devices, 1979. V. 26. P. 1880.
2. Harrison D.J., Manz A., Fan Z. // Anal. Chem. 1992. V. 64. P. 1926-1932.
3. Jacobson S.C., Hergenroeder R., Kounty L.B. // Anal. Chem. 1994. V. 66. P. 1114-1118.
4. Fodor S., Read J.L., Perring M.C. // Science. 1991. V. 251. P. 767-773.
5. Hacia J.C., Makalovski W., Edgemon K. // Nature Genetics. 1998. V. 18. P. 155-158.
6. Cronin M.T., Fucini R.V., Kirn S.V. // Human Mutation, 1996. V. 7. P. 244-255.
7. Храпко К., Шик В., Мирзабеков А. // Доклады Академии наук СССР, 1988. Т 303. С. 1508-1511.
8. Jacobson S.C., Hergenroeder R., Kounty L.B., Warmack R.J., Ramsey J.M. // Anal. Chem. 1994. V. 66. P. 1107-1113.
9. Mikkers F., Everaerts F., Verheggen T. // J. Chromatogr. 1979. V. 169. P. 1.
10. Li S.F.Y. // Capillary Electrophoresis principles. 1992. Elsevier. 586 p. P. 6-28.
11. Jorgenson J.W., Lukas K.D. // Anal. Chem. 1981. V. 53. P. 1298.
12. Culbertson Ch. T., Jacobson S.C., Ramsey J.M. // Anal. Chem. 1998. V. 70. P. 3781-3789.
13. Kutter J., Jacobson S.C., Matsumura N. // Anal. Chem. V. 70. P. 3291-3297.
14. Jacobson S.C., Ramsey J.M. // Electrophoresis. 1995. V. 16. P. 481-486.
15. Effenhauser C.S., Manz A., Widmer H.M. // Anal. Chem. 1993. V. 65. P. 2637-2642.
16. Schults-Lockyear L.L., Colyer C.L., Fan Z.H. // Electrophoresis. 1999. V. 20. P. 529-538.
17. Fluri K., Fitzpatrick G., Chiem N., Harrison D.J. // Anal. Chem. 1996. V. 68. P. 4285-4290.
18. Jacobson S.C., Culbertson C.T., Daler J.E. // Anal. Chem. 1998. V. 70. P. 3476-3480.
19. Jacobson S.C., Michael J. // Anal. Chem. V. 68. P. 720-723.

(Продолжение в следующем номере.)

УДК 678.7

Е.П. Гребенников,
ОАО ЦНИТИ "Техномаш"

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАКТЕРИОРОДОПСИНСОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

Часть I

Исследуются бактериородопсинсодержащие полимерные пленки в целях организации на их основе процессов обработки информации. Базовые процессы преобразования информации бактериородопсинсодержащими средами определяются обратимыми свето-зависящими изменениями показателей поглощения и преломления. Рассматриваются оптико-физические, технологические и конструкционные свойства бактериородопсинсодержащих полимерных пленок.

Введение

В настоящее время в области информатики бурное развитие переживают нейросетевые технологии обработки информации. Исходные идеи нейрокомпьютинга, сформулированные Мак-Каллоком и Питсом еще в 40-е годы, предполагали построение вычислительных устройств на основе сетей нейроподобных элементов по аналогии с биологическими нейронными структурами. Однако в отличие от получивших широчайшее распространение цифровых компьютеров, основанных на парадигме фон-Неймана, нейрокомпьютеры ожидали рождения своей элементной базы очень долго. Технологии микроэлектроники ориентировались на обслуживание архитектуры фон-неймановских компьютеров, а работы в области нейрокомпьютинга носили теоретический характер и были направлены на создание пакетов программ, эмулирующих работу нейронных сетей. За последние несколько лет ситуация коренным образом изменилась. Созданием элементной базы нейрокомпьютеров усиленно занимаются не только страны, лидирующие в сфере производства электроники, но и страны, пока еще отстающие, рассчитывающие занять новые позиции на рынке информационных технологий.

Государственные программы США, Японии, стран Западной Европы на период 1989-1997 гг. предусматривали создание нейрокомпьютеров и на их основе интеллектуальных робототехнических систем, способных к автономному обучению и последующей успешной работе в сложных условиях внешней среды.

Ряд частных фирм, например Фудзицу, Хитачи, Нихон денки и другие (Япония), также объединили усилия в этой области.

В 1993 г. в Японии принята десятилетняя программа в целях создания аддитивной эволюционирующей ЭВМ на основе нейросетевых подходов [1].

Чем обусловлен такой интерес? Жесткое соревнование в сфере информационных технологий при достигнутом уровне развития техники привело к острой необходимости решить задачи, для которых традиционные компьютерные системы неэффективны. К таким задачам относятся:

- распознавание образов в реальном масштабе времени, формирование адекватных сигналов управления в условиях фрагментарной и неточной информации для управления сложными динамическими объектами в быстро изменяющихся условиях внешней среды (в том числе автономными, не находящимися под жестким внешним управлением, например, беспилотными летательными аппаратами);
- создание крупных распределенных систем искусственного интеллекта для сетевого компьютеринга в целях организации баз знаний и оптимизации доступа к информации (например, ассоциативный поиск на основе распознавания образов) через дружественные интеллектуальные интерфейсы [2], для децентрализованного интеллектуального управления технологическим оборудованием;
- распознавание, сжатие и защита информации, решаемые обработкой информации самоорганизующимися нейроподобными структурами в системах спутниковой и другой связи.

Эффективно решать эти задачи позволяют следующие свойства нейронных сетей:

- массовый параллелизм, ассоциативность, асинхронность и самоорганизация процессов обработки информации;
- обучаемость – возможность решать неформализуемые или трудно формализуемые задачи путем обучения на ограниченном числе примеров;
- надежность, в смысле монотонного, а не катастрофического ухудшения технических параметров устройств на основе нейронных сетей в случае отказа отдельных элементов сети;
- экономическая эффективность как отношение производительности нейронных сетей к их стоимости.

Принято считать, что чем больше в сети нейроподобных элементов и чем больше связей между элементами, тем большей вычислительной мощностью обладает сеть. В идеале все элементы связаны друг с другом – это так называемые *полносвязные* нейронные сети. Реализация полносвязных сетей в микроэлектронике имеет свои трудности, так как в современных технологиях плотность связей уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от нейрона-источника [3], и хотя поиск решений этих проблем в технологиях микроэлектроники идет очень активно [4], существенные надежды связаны с разработкой и применением оптических и оптоэлектронных нейрокомпьютеров.

Световые потоки не взаимодействуют, поэтому в оптических системах есть возможность соединять нейроны в трехмерном пространстве (трехмерные сети). Плотность путей передачи сигналов ограничена только размерами источников и приемников света. Потенциально эти размеры могут составлять несколько микрометров. Все пути могут работать одновременно, обеспечивая высокий темп передачи данных [5].

В то же время, разработчики элементной базы предпринимают попытки применить новые перспективные технологии и материалы. Широко разрабатывается "проблема интеграции материалов, процессов и принципов микро-,nano-, и биотехнологии для целенаправленного синтеза элементов и функциональных сред, являющихся базисом технических систем восприятия, преобразования, хранения и передачи информации нового поколения" [6].

Анализ материалов ряда международных конференций, например, "5-го Международного симпозиума по биоэлектронике и молекулярным электронным приборам", "6-й Международной конференции по молекулярной электронике и биокомпьютингу", проходивших в конце 1995 г. в Японии, Международного симпозиума "Информационная оптика. Научные основы и технология" (1997 г., Москва), показывает, что усилия разработчиков перспективных технологий концентрируются на поиске новых базовых процессов обработки информации и формировании альтернативной элементной базы нейрокомпьютеров на основе новых материалов.

Результаты "Международной конференции по нейронным сетям и их применению" (International Work Shop Cellular Neural Network and there Application. CNNA 98, Лондон, 1998 г.) свидетельствуют об устойчивости этой тенденции, о том, что на Западе осуществляется пересмотр концептуальных положений компьютеринга.

В основе формирующихся концепций бионейрокомпьютинга, в частности, лежат представления о принципах самоорганизации процессов в открытых нелинейных распределенных диссипативных системах, каковыми являются биологические объекты [7], включая нейроны и нейронные сети.

В настоящее время осуществлены успешные реализации прототипов таких систем на биомолекулярном уровне, способных реализовать нелинейные механизмы обработки информации и выполнять в качестве элементарных сложные логические операции, эквивалентные большому числу элементарных двоичных операций [8, 9].

Одним из перспективных, с точки зрения информационных технологий, биологическим материалом является бактериородопсин [10]. Реализованы построения нейроподобных систем на его основе, использующие в качестве базового процесса фотозависимый перенос протона через мембрану [11].

Нами предложены механизмы формирования нейроподобных структур на основе бактериородопсина-содержащих полимерных пленок, объединяющие биомолекулярные технологии и оптические методы обработки информации.

Предварительные исследования показали возможность построения информационных систем, реализующих нейросетевую технологию на основе оптических нейроподобных элементов, которые включают в себя полимерные пленки, содержащие светочувствительный белок. Обработка информации осуществляется на уровне групп молекул бактериородопсина. Оптическими методами реализуются параллельные массовые самоор-

ганизующиеся информационные процессы, распределенные в бактериородопсин-содержащих пленках посредством системы многослойных плоских волноводов. Оценка возможных конструкторских решений показала их приемлемую технологичность и реализуемость.

Создание адаптивной элементной базы на основе бактериородопсинсодержащих сред, способно привести к экспансии нейрокомпьютерных технологий в новых применениях, из которых весьма перспективны следующие:

- управление микроробототехникой и гибкими роботизированными производственными микросистемами, которые являются серьезной (с точки зрения экономической эффективности) альтернативой построению производства микроэлектронных устройств традиционными методами [12];
- адаптивное протезирование на основе искусственных структур для инвалидов путем компенсации функций утраченных фрагментов нервных тканей.

Чувствительность бактериородопсина в оптическом диапазоне позволяет осуществить непосредственное восприятие визуальной информации из внешней среды подобно зрительной системе живых организмов. Совмещение функций восприятия изображения и обработки информации, высокая интеграция элементов и процессов в многослойной бактериородопсинсодержащей системе толщиной десятки микрометров, которая может быть сформирована на поверхностях и полостях микроустройств, а также применение оптических методов позволяют резко снизить размеры системы управления и оптимально компоновать ее для условий автономно движущегося объекта, микроминиатюризировать систему очувствления и адаптивного управления автономными микроробототехническими комплексами.

Исследования, проведенные совместно с лабораторией нейрокибернетики института мозга РАМН, показали перспективность многослойных бактериородопсинсодержащих структур для создания на их основе адаптивных протезов зрительного анализатора и протезов, компенсирующих травмы спинного мозга и связанные с этим нарушения двигательных функций.

В настоящей статье рассмотрены результаты работ по формированию и исследованию бактериородопсинсодержащих пленок, адекватных задаче нейросетей обработки информации.

1. Бактериородопсин и его свойства, используемые при обработке информации

Бактериородопсин (БР) – светочувствительный белок, подобный зрительному родопсину человеческого глаза. БР получают из галобактерий, в клеточные мембранных которых он встроен (так называемые "пурпурные мембранны"). В технических целях используют пленки [10], изготавливаемые на основе суспензий фрагментов пурпурных мембран (ПМ).

При выделении из клеток бактерий ПМ сохраняют свою структуру полностью. Это единственная в своем роде биокристаллическая структура, способная в течение многих лет не изменять свои свойства в составе

"сухих" и полимерных пленок толщиной от 5 нм (монослои) до нескольких десятков микрометров.

Фундаментальное свойство БР – наличие у него фотохимического цикла: после поглощения кванта света молекула БР проходит последовательность состояний и самопроизвольно возвращается в исходную форму. При этом в соответствии с циклическим изменением состояния молекул БР возникают наведенные светом циклические изменения оптико-физических характеристик – показателей преломления и поглощения.

Спектральная чувствительность БР лежит в оптическом диапазоне. Максимум поглощения в исходном состоянии молекул в форме БР570 соответствует длине волны 570 нм. Основное промежуточное состояние М412 имеет максимум поглощения на длине волны 412 нм. Поглощение БР-содержащими средами оптического излучения имеет свои особенности, связанные с изменением концентрации поглощающих центров (молекул в форме БР570) в результате поглощения этими центрами квантов света на длине волны 570 нм и перехода в форму М412 с низким поглощением на длине волны 570 нм. В результате поглощение в области зеленого света падает, среда становится более прозрачной – просветленной. Выраженность эффекта просветления БР-содержащей среды зависит, в частности, от времени релаксации молекул интермедиата М412 в форму БР570. Время релаксации характеризуют периодом полураспада молекул интермедиата М412. Световое воздействие на этой длине волны вызывает быстрый принудительный перевод молекулы в исходное состояние. Значения временных параметров фотоцикла лежат в интервале от долей миллисекунд до десятков секунд.

Таким образом, БР ведет себя как фотохромная среда, с малым временем хранения информации. Оптико-физические и временные характеристики модифицируются в широком диапазоне условиями производства и составом матрицы (среды окружения).

2. Технические требования к БР-содержащим полимерным пленкам

В процессе проводимой работы над конструкционно-технологической реализацией базовых элементов бионейрокомпьютеров решена задача формирования довольно тонких (6-14 мкм) БР-содержащих полимерных пленок. Изготовление таких пленок сопровождается рядом требований, обусловленных свойствами исходного материала и спецификой его применения.

Для того чтобы в процессе функционирования значимо проявлялись фотохромные эффекты – наведенные изменения показателей преломления и поглощения, необходима высокая оптическая плотность и, соответственно, значительная концентрация БР в полимерных пленках. Оптическая плотность таких пленок должна лежать в пределах 0,8-1,3 Д. В этом случае базовые свойства БР-содержащих сред реализуются при оптимальной плотности световых потоков и могут быть использованы в технических целях. При воздействии световых потоков с плотностью энергии 10-100 мВт/см² наводимые в таких пленках изменения поглощения-

пропускания при длительности воздействия 0,1-10 с составляют 10-50 % первоначального значения.

Предъявляются также требования к однородности распределения концентрации БР, следующие из условий функционирования пленок в режиме наведенного изменения поглощения, так как оптическая неоднородность вносит искажения в процессе преобразования оптической информации.

Кроме того, необходимо реализовать воспроизducимость основных конструктивных параметров: толщины пленки, качества поверхности, равномерности распределения БР по всей площади пленки и др.

3. Конструкционно-технологические характеристики БР-содержащих полимерных пленок

В соответствии с техническими требованиями выработана технология изготовления прозрачных оптически однородных БР-содержащих полимерных пленок на стеклянных оптических подложках площадью до 3 см² и толщиной 6-14 мкм с оптической плотностью 0,8-1,3D на длине волны 570 нм.

Выбор полимерной матрицы. Для того чтобы минимизировать влияние дифракционной расходности на процессы преобразования информации, толщина БР-содержащих пленок должна быть порядка 6-14 мкм. Чтобы достичь указанной оптической плотности при таких толщинах, необходимо получить 40-50 %-е объемное содержание БР в полимерной пленке. Обеспечить выполнение таких требований способны далеко не все полимеры, прозрачные в оптическом диапазоне. Для формирования БР-содержащих полимерных пленок могут быть использованы только водорастворимые полимеры.

Проведенные сопоставительные исследования по формированию БР-содержащих полимерных пленок на основе поливинилового спирта и желатины выявили, что полимерные матрицы на основе желатины обладают несомненными преимуществами.

В пленках на основе желатины удается создать, по-видимому, предельно возможную объемную концентрацию БР (до 50 % объема) и избежать при этом агрегации фрагментов ПМ, что достигается использованием термодинамических особенностей процесса полимеризации желатины. Свойства желатины позволяют практически полностью избежать разрушения структуры белка БР в процессе приготовления полимерной смеси и последующей полимеризации.

Встроенные в желатиновую матрицу фрагменты ПМ долговечны и устойчивы к воздействию многих технологических факторов. Полимеризованная желатина создает оптимальные условия для функционирования БР, удерживая достаточное количество воды, необходимое для реализации фотохромного цикла. По этой же причине желатиновые матрицы позволяют без ухудшения оптических свойств пленок размещать водорастворимые компоненты-модификаторы свойств среды, т.е. создают возможность модифицировать химическое окружение молекул БР и, следовательно, временные параметры фотоцикла.

Показатель преломления БР-содержащих полимерных пленок. При решении задач конструирования возникла необходимость в точном знании значения показателей преломления собственно БР (в так называемых "сухих пленках") и полимерных БР-содержащих пленок. Имеющиеся публикации содержат противоречивые данные: 1,28 в [13] и 1,4-1,5 в [14], поэтому были проведены собственные измерения показателя преломления.

Показатель преломления БР измерялся на рефрактометре ИРФ-454Б, позволяющем измерять показатель преломления в диапазоне от 1,2 до 1,7 в отраженном и проходящем свете. Пленка формировалась непосредственно на поверхности измерительной призмы методом полива суспензии с концентрацией 15-20 мг/мл и последующего высушивания при температуре 22 °C и относительной влажности 60 %. Толщина пленки достигала 20 ± 5 мкм.

Получено значение показателя преломления $1,534 \pm 0,002$ в "белом" свете для так называемых "воздушно-сухих пленок" БР. Этот результат хорошо воспроизводится на каждом из препаратов, приготовленных из трех различных штаммов галобактерий, и согласуется с результатами последующих измерений показателя преломления полимерных БР-содержащих пленок. Значение показателя преломления в этом случае определяется объемными отношениями БР и полимеров.

Измерение показателя преломления желатины проводилось в целях прогнозирования параметров изготавливаемых полимерных БР-содержащих пленок в зависимости от количества БР в пленке. Показатель преломления полимерной пленки, полученной на основе желатины без БР (формирование методом полива на поверхности измерительной призмы рефрактометра), составил $1,543 \pm 0,001$. Это значение не противоречит данным [15]. Измерения осуществлялись при температуре 22 °C и относительной влажности 60 %.

Для измерения показателей преломления полимерных БР-содержащих пленок пленка формировалась непосредственно на поверхности измерительной призмы рефрактометра нанесением полимерной смеси желатины и БР с последующей полимеризацией. После полимеризации толщина пленки составляла обычно 50 ± 10 мкм. Измерения осуществлялись также при температуре 22 °C и относительной влажности 60 %. Значения показателя преломления лежали в пределах 1,539-1,542 в зависимости от соотношения объемных и массовых концентраций БР и желатины.

Рассеяние оптического излучения в пленках. Для процессов обработки и преобразования оптической информации важно учитывать фактор рассеяния оптического излучения в БР-содержащих средах. Значительное рассеяние обусловлено размерами ПМ, которые лежат в пределах 500-1000 нм и сопоставимы с длиной волны излучения оптического диапазона. Поэтому исходные суспензии пурпурных мембран и БР-содержащие пленки на их основе оптически неоднородны, что ведет к потере функциональных свойств.

Минимизация рассеяния достигается несколькими путями: на этапе подготовки суспензии ПМ разделением

их на фрагменты, на этапах подготовки полимерной смеси и полимеризации – исключением процессов агрегации фрагментов ПМ.

В процессе технологических исследований с помощью ультразвуковой обработки удалось получить прозрачные оптически однородные суспензии БР, не вводя в состав детергентов, побочным действием которых может быть частичная денатурация белка БР.

Оценка размеров фрагментов ПМ в обработанных суспензиях была сделана путем измерения доли рассеянного в стороны НеНе-лазерного излучения при прохождении последнего через кювету с водным раствором БР известной концентрации. Расчет осуществлялся с использованием формулы Рэлея для интенсивности света, рассеянного на сферических частицах, размеры которых малы по сравнению с длиной волны падающего света:

$$= \frac{9}{2} \frac{\lambda^4 N V^2}{L^2} \frac{2}{0} \left(\frac{-}{+} \frac{0}{0} \right) (1 + \cos^2 \theta)$$

где θ – интенсивность рассеянного света; I_0 – интенсивность падающего света; λ – длина волны падающего света; N – число частиц; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость среды, в которой взвешены частицы; V – объем и диэлектрическая проницаемость частицы; L – расстояние от рассеивающего объема до точки наблюдения; θ – угол рассеяния.

Значения $L = 3$ см, $\lambda = 10^{-4}$, $\epsilon_0 = 10^{-4}$, $\lambda = 0,63$ мкм, $\theta = 90^\circ$.

Число частиц N вычислялось по концентрации БР в водной суспензии, которая, в свою очередь, определялась по оптической плотности суспензии. Оптическая плотность измерялась на спектрофотометре СФ-10. В данном эксперименте концентрация БР в водной суспензии составила $3,5 \times 10^{-4}$ моль/см³.

Оценка значения для БР осуществлялась в отдельном эксперименте сравнением рассеяния излучения в водной суспензии бактериородопсина и в суспензии бактериородопсина на основе смеси воды и глицерина. Получено значение диэлектрической проницаемости БР $\epsilon_{BR} \cong 40 \pm 3$.

Рассчитанное из формулы Рэлея характерное значение диаметра фрагментов ПМ находится в пределах $6,75 \pm 0,5$ нм. Учет возможной несферичности рассеивающих фрагментов приводит к значению наибольшего размера фрагмента $8,7 \pm 0,5$ нм, это примерно соответствует размерам типичных элементов ПМ – тримеров белков бактериородопсина.

Можно предположить, что применяемый технологический режим обработки суспензий позволяет без разрушения белков БР разделять ПМ на естественные минимальные фрагменты и говорить о принципиальной возможности достижения оптического разрешения БР-содержащей среды на уровне нескольких тысяч линий на миллиметр.

При изготовлении полимерной смеси на основе БР последний проявил свойство агрегации на молекулах полимера, в связи с чем нарушилась оптическая однородность пленок.

В результате технологических экспериментов удалось подобрать температурные условия, при которых

агрегация не наблюдалась, и получить прозрачные оптически однородные БР-содержащие полимерные смеси.

Поскольку в процессе полимеризации пленок из полимерной смеси возможно агрегирование фрагментов, была выполнена оценка размеров фрагментов ПМ, встроенных в пленку. Оценка заключалась в помещении желатиновых пленок с БР в систему скрещенных поляроидов (поляризатор-анализатор). Интенсивное излучение НеНе-лазера (около 40 мВт) проходило через поляризатор, настраиваемый на максимум пропускания, а затем – через анализатор, настраиваемый на минимум пропускания, так чтобы фотоприемник на выходе анализатора не регистрировал никакого излучения. Внесение в систему между скрещенными поляроидами пленок со встроенными фрагментами ПМ не вносило изменений в нулевой сигнал фотоприемника. Это означает отсутствие поворота плоскости поляризации в направлении распространения света и значительного рассеяния, что свидетельствует об оптической прозрачности пленок и о том, что размер фрагментов ПМ существенно меньше 0,63 мкм.

Выработанная технология позволяет, следовательно, без разрушения белков БР эффективно встраивать минимальные фрагменты ПМ (тримеры белка БР) в полимерные комплексы, способные формировать оптически однородные тонкие пленки.

Оптическая неоднородность, обусловленная качеством поверхности и распределением концентрации БР вдоль поверхности пленки. Оптическая неоднородность распределения показателя поглощения получаемых БР-содержащих пленок определяется произведением двух величин: неравномерности распределения объемной концентрации БР вдоль поверхности пленки и качества поверхности пленки (локальных отклонений от среднего значения толщины). В совокупности это ведет к локальным отклонениям так называемой "поверхностной" концентрации БР-содержащих пленок и оптической плотности.

Оптическая однородность пленок, обусловленная только качеством поверхности, обеспечивается сравнительно легко как для пленок, выполняемых методом полива, так и для пленок, получаемых методом центрифугирования.

Для контроля качества поверхности и измерения толщины пленки использовался микроГИФРометр Линника МИИ-4.

Установлено, что характерное отклонение толщины получаемых БР-содержащих пленок менее 50 нм на длине 10 мм, например, при толщине пленки более 5 мкм составляет менее 1 %.

Обеспечение оптической однородности, связанной с распределением объемной концентрации БР вдоль поверхности пленки, затруднено миграцией молекул в полимерных растворах в процессе полимеризации в зоны повышенного поверхностного натяжения. Экспериментально установлено, что введение в полимерную смесь в качестве пластификатора этиленгликоля (из соотношения 0,025 мл этиленгликоля на каждые 100 мг сухой массы полимера матрицы) существенно снижает

поверхностное натяжение и миграцию БР вдоль поверхности пленки, а также увеличивает прочность и пластичность БР-содержащих пленок, улучшает их адгезивные свойства и не приводит к ухудшению качества поверхности.

Достигнутое нами отклонение от среднего значения по распределению объемной концентрации БР не превышает 3 %, поскольку в этих же пределах лежат изменения поверхностной концентрации и связанной с ней оптической плотности.

Список литературы

1. Галушкин А.И. О современных направлениях развития нейрокомпьютеров // Информационные технологии. 1997. № 5. С. 3-5.
2. Datamation. 1996. Vol. 42. № 14. P. 68-73.
3. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. М.:Мир. 1992. 240с.
4. Бубенников А.Н., Бубенников А.А. Технологические проблемы создания субмикронных нейрочипов и нейросистем на пластинах // Информационные технологии. 1997. № 5. С. 21-28.
5. Евтихиев Н.Н., Оныкий Б.Н., Перепелица В.В., Щербаков И.Б. Гибридные оптоэлектронные нейрокомпьютеры // Нейрокомпьютер. № 3, 4.

6. Лучинин В.В. Проблемы интеграции микро- и биотехнологии // Петербургский журнал электроники. 1991. № 1.

7. Пригожий И. От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985.

8. Рамбиди Н.Г. Биомолекулярные нейрокомпьютеры// Нейрокомпьютер. 1998. № 1, 2.

9. Ramhidi N.G., Maximychev A.V. Towards a biomolecular computer. Information processing capabilities of biomolecular nonlinear dynamic media // BioSystems. 1997. V. 41. P. 195-211.

10. Всеволодов Н.Н. Биопигменты-фоторегистраторы. Фотоматериал на бактериородопсине. М.: Наука. 1988. 222 с.

11. Dab Haronian and Aaron Lewis. Elements of a unique bacteriorhodopsin neural network architecture. Applied optics. Vol. 30. № 5. P. 597-608.

12. IEEE Control Systems. 1996. Vol. 16. № 1. P. 6-12.

13. Алексеев А.С., Валинский С.И., Савранский В.В. Нелинейно-оптические свойства Ленгмюра-Блоджет-монослоев бактериородопсина // Тр. ИОФАН. 1992 Т. 38. С. 133-150.

14. Dieter Oesterhelt, Christoph Brauchle and Norbert Hamm. Bacteriorhodopsin: a biological material for information processing // Quarterly Reviews of Biophysics 24, 4 (1991). P. 425-478.

15. Основы технологий светочувствительных фотоматериалов / Под ред. В.И. Шеберстова. М.: Химия. 1977. 504 с.

(Продолжение в следующем номере.)

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ ЖУРНАЛА "МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – Мальцев Петр Павлович, д-р техн. наук, проф., начальник сектора Секции прикладных проблем при Президиуме РАН, зав. каф. "Микросистемная техника" МИРЭА, г. Москва

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА – Лучинин Виктор Викторович, д-р техн. наук, доц., директор Центра диагностики и микротехнологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, г. С.-Петербург

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Антонов Борис Игоревич, главный редактор литературы по информатике и отраслевым изданиям, изд-во "Машиностроение", г. Москва

Аристов Виталий Васильевич, д-р техн. наук, чл.-корр. РАН, директор Института проблем технологий микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, п. Черноголовка, зав. каф. "Наноэлектроники" МФТИ

Васильев Александр Алексеевич, главный специалист Миннауки России, г. Москва

Гапоинов Сергей Викторович, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Института микроструктур РАН, зав. каф. "Электроника" Нижегородского государственного университета, г. Нижний Новгород

Горнев Евгений Сергеевич, канд. техн. наук, зам. директора НИИ молекулярной электроники и завода "Микрон", г. Зеленоград

Градецкий Валерий Георгиевич, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией Института проблем механики РАН, г. Москва

Журавлев Петр Васильевич, канд. техн. наук, с.н.с., зам. директора Конструкторско-технологического института прикладной микроэлектроники СО РАН, г. Новосибирск

Калиев Игорь Анатольевич, д-р техн. наук, проф., директор НИИ многопроцессорных вычислительных систем Таганрогского государственного радиотехнического университета, зав. каф. "Автомобильная электроника", г. Таганрог

Климов Дмитрий Михайлович, д-р техн. наук, проф., акад. РАН, академик-секретарь Отделения проблем машиностроения, механики и процессов управления РАН, директор Института проблем механики РАН, г. Москва

Кузин Александр Юрьевич, д-р техн. наук, с.н.с., начальник отдела 32 ГНИИ МО РФ, г. Мытищи, Моск. обл.

Лифшиц Виктор Георгиевич, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Научно-технологического центра полупроводниковой микроэлектроники Института автоматики и процессов управления ДВО РАН, зав. каф. "Физика и технология материалов для полупроводниковой электроники" ДГУ, г. Владивосток

Мокеров Владимир Григорьевич, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., зам. директора Института радиотехники и электроники РАН, зав. каф. "Полупроводниковые приборы" МИРЭА, г. Москва

Норенков Игорь Петрович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. "САПР" Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Панфилов Юрий Васильевич, д-р техн. наук, профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Петросянц Константин Орестович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой "Электроника и электротехника" Московского государственного института электроники и математики (технического университета), г. Москва

Сауров Александр Николаевич, д-р техн. наук, доц., директор НПК "Технологический центр" Московского государственного института электронной техники (технического университета), г. Зеленоград

Сигов Александр Сергеевич, д-р физ.-мат. наук, проф., ректор Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета), заведующий кафедрой "Электроника конденсированных сред" МИРЭА, г. Москва

Телец Виталий Арсеньевич, д-р техн. наук, с.н.с., заместитель начальника управления 22 ЦНИИ МО РФ, г. Мытищи, Моск. обл.

Чаплыгин Юрий Александрович, д-р техн. наук, проф., ректор Московского государственного института электронной техники (технического университета), заведующий кафедрой "Микроэлектроника и микросистемная техника", МИЭТ, г. Зеленоград