# HARD-EI MEREPOGEIGIEMHAG

# 

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

# **Главный редактор** Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора Лучинин В. В.

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

## Редакционная коллегия:

Абрамов И. И. Андриевский Р. А. Антонов Б. И. Арсентьева И. П. Астахов М. В. Быков В. А. Горнев Е. С. Градецкий В. Г. Гурович Б. А. Кальнов В. А. Карякин А. А Колобов Ю. Р. Кузин А. Ю. Мокров Е. А. Норенков И. П. Панич А. Е. Панфилов Ю. В. Петросянц К. О. Петрунин В. Ф. Путилов А. В. Пятышев Е. Н Сухопаров А. И. Телец В. А. Тимошенков С. П. Тодуа П. А. Шубарев В. А.

**Отв. секретарь** Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В. **Учредитель:** 

учредитель. Издательство "Новые технологии" СОДЕРЖАНИЕ

Издается с 1999 г.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ Алексенко А. Г., Ефимов Н. Н., Паршуков В. И., Пономарев А. Н. Наномоди- фикация твердого топлива для тепловых электростанций	2
<b>МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ</b> Штенников В. Н. Уточняем международный стандарт МЭК	5
	0
Бохов О. С., Бройко А. П., Корляков А. В., Лучинин В. В. Микросенсор для контроля остаточного давления на основе периодического теплового режима . Воронин А. И., Осипков А. С., Горбатовская Т. А. Механическая прочность вет-	14
вей термоэлементов на основе Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> при различных методах их получения Амеличев В. В., Гамарц И. А., Касаткин С. И., Лопатин В. В., Муравьев А. М., Плотникова Н. В., Резнев А. А., Решетников И. А., Чаплыгин Ю. А. Анизотроп-	17
ные магниторезистивные преобразователи на основе ферромагнитных нано- структур с различным содержанием кобальта	22
авления от 0,025 до 25 МПа	24 31
Зайцев Н. А., Матюшкин И. В. Особенности формирования подзатворной сис- темы наноприборов	36
товых источников на основе наноструктурированных автоэмиссионных катодов	39
<b>МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА</b> Потапов А. А. Расчет прочности связи простых гидридов элементов таблицы Д. И. Менделеева	46
СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ	
Губарев В. А., Воронков С. О. Системное моделирование устройства для реализации в СБИС СнК с применением программы-анализатора алгоритмов Contents	51 55
Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находя в свободном доступе на сайтах журнала (http://www.microsystems.ru) и научной электрон библиотеки (http://elibrary.ru). Электронные версии полнотекстовых статей расположены сайте журнала: с 1999 г. по 2003 г. в разделе "ПОИСК СТАТЕЙ", а с 2004 г. — в разделе "АРХИ	ится ной на 1В".
ПОДПИСКА: Адрес для переписки:	

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

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2010

# Чанотехнологии и зондовая микроскопия

УДК 621.3.049.77

А. Г. Алексенко, д-р техн. наук, проф., e-mail: aalexenko@mail.ru, HOЦ "Нанотроника" НИЯУ МИФИ, г. Москва, H. H. Ефимов, д-р техн. наук, проф., ЮРГТУ, г. Новочеркасск, e-mail: efimov@novoch.ru, B. И. Паршуков, ЮРГТУ, г. Новочеркасск, e-mail: v\_parshukov@mail.ru, A. H. Пономарев, канд. техн. наук, OOP "НТП прикладных нанотехнологий", проф. СПбГТУ, г. Санкт-Петербург, e-mail: 9293522@gmail.com

# НАНОМОДИФИКАЦИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Внесение нанодобавок — активаторов в топливную смесь, применяемую в тепловых электростанциях (ТЭС), позволяет увеличить скорость реакции окисления и температуру сгорания в 1,5 раза по сравнению с исходными показателями. Промышленное масштабирование этой технологии позволит существенно повысить коэффициент полезного действия ТЭС, что явится прорывом в практической теплоэнергетике.

Ключевые слова: наномодификация, твердое топливо, астралены, таунит, сингулетно-возбужденный кислород, катализатор, горение, воспламенение, ТЭС, теплоэнергетика, топливоприготовление

# Необходимость наномодификации

Российские тепловые электростанции (ТЭС) в настоящее время работают преимущественно на твердом топливе и природном газе. При этом в связи с дефицитностью и удорожанием природного газа эффективность использования твердого топлива возрастает. Уголь, который поступает на ТЭС, не всегда хорошего качества. Он имеет высокую зольность (30 % и более), малую теплоту сгорания (10—20 МДж/кг) и малое содержание горючих летучих примесей в топливе. Такое низкореакционное топливо плохо воспламеняется и горит.

Чтобы улучшить качественные характеристики топлива, на ТЭС вынуждены применять "подсветку" дополнительным, более реакционным топливом природным газом или мазутом. Например, при сжигании антрацитового штыба (содержание горючих летучих 5 %) на Новочеркасской ГРЭС приходится добавлять до 10—15 % природного газа. Это усложняет рабочие процессы и увеличивает топливные затраты на производство энергии (дополнительные затраты составляют в итоге 70—80 %).

Длительная эксплуатация ТЭС приводит к постепенному снижению их эффективности. Чтобы скомпенсировать уменьшение теплоты сгорания топлива, приходится увеличивать расход топлива, что ухудшает экономические показатели станции и экологическую обстановку вокруг нее.

С учетом вышесказанного улучшение физико-химических характеристик твердого топлива и повышения параметров процессов его горения на ТЭС является крайне актуальной задачей, направленной на снижение топливных затрат, себестоимости и экологической опасности производства электроэнергии.

Улучшение процессов воспламенения и горения твердого топлива на ТЭС в настоящее время решается следующими способами:

- освоением новых технологий сжигания твердого топлива (применением циркулирующего кипящего слоя, газификацией топлива и др.). Такие технологии могут быть освоены только путем демонтажа старого оборудования и установки новых котлов ТЭС, что требует больших капитальных затрат;
- введением дополнительных высокотемпературных муфелей, предтопков, плазменных устройств и т. д., влияющих на процессы воспламенения и горения, которые не всегда дает положительные результаты, особенно для низкореакционного топлива;
- осуществлением охарактеризованной выше "подсветки" дополнительным более реакционным и более дорогим топливом.

Существующие подсистемы твердотопливных ТЭС реализуют операции топливоприготовления, топливоподачи и воздухоподготовки. Физико-химические характеристики топлива (теплота сгорания, содержание горючих летучих и др.) при обработке в этих системах остаются одинаковыми с исходными.

Применяемая технология подготовки низкореакционного твердого топлива на ТЭС реализуется использованием мельниц, в которых топливо может измельчаться до минимальных размеров в 20—30 мкм.

Новый способ предварительной подготовки топлива под заданные параметры, необходимые для улучшения воспламенения и горения в котлах ТЭС, основан на использовании наночастиц-активаторов.

Как показали выполненные нами экспериментальные исследования, внесение каталитических количеств таких наноматериалов (астраленов, таунита, растворимых в воде аддуктов нанокластеров углерода и т. д.) резко меняет характер воспламенения и интенсивность горения твердого топлива (рис. 1—3). Увеличение скорости реакции окисления топлива и верхнего порогового уровня температуры проявляется уже при количестве нанокатализаторов в топливе в 0,001 %.

*Механизм* активации процессов горения связан, по нашему мнению, с образованием синглетно-возбужденного (синглетного) кислорода при каталитическом сжигании топлива.

Синглетный кислород — общее название для двух метастабильных состояний молекулярного кислорода с более высокой энергией, чем в основном, триплетном, состоянии. Основной устойчивой формой  $O_2$  является "триплетный" кислород, в молекуле которого оба неспаренных электрона параллельны и их валентности (спины) направлены в одну сторону. Кислород, в молекуле которого валентности направлены в разные стороны, называется синглетным, он



Рис. 1. Динамика горения. Астралены:









Рис. 3. Скорость достижения повышенных температур горения: *1* — кривая разгона температур, характеризующая выгорание исходного топлива (АШ); *2* и *3* — кривые разгона температур, характеризующие выгорание навесок угля с наноматериалом "Таунит" в массовом соотношении 200/1; 100/1

является нестабильным и токсическим для биологических субстанций.

Энергетическая разница между самой низкой энергией  $O_2$  в синглетном состоянии и наименьшей энергией триплетного состояния составляет около 0,98 эВ [1, 2].

Теоретически невозможны прямое фотовозбуждение обычного  $O_2$  и переход его в синглетно-возбужденное состояние. Поэтому синглетно-возбужденный  $O_2$  генерируется косвенно, например, фотохимическим путем (из молекул хлорофилла при фотосинтезе [3]), в результате иных химических или химико-биологических процессов (например, перекисных реакций) либо под воздействием ионизирующего излучения. Молекулы сингулетно-возбужденного кислорода, по-видимому, являются важнейшими регуляторами клеточной жизнедеятельности, существенно определяющими механизм инициации апоптоза (запрограммированной клеточной смерти).

В организмах млекопитающих сингулетно-возбужденный кислород является активнейшим окислителем холестерина, что в конечном итоге приводит к сердечно-сосудистым воздействиям (как полезным, так и вредным). Различные активные формы  $O_2$  участвуют в широком спектре окислительных механизмов в биологических организмах (например, при образовании вредных для здоровья человека свободных радикалов). Вместе с тем, кислород с повышенной активностью может оказаться полезным, поскольку кванты света с длинами волн 634 и 1269 нм участвуют в реакциях в биологических средах, а клеточная фоточувствительность присутствует во всех живых системах [5].

Одним из возможных методов генерации сингулетно-возбужденного кислорода служит передача энергии возбуждения от нанокластеров углерода фуллероидного типа к молекуле кислорода, используемой для инактивации вирусов и бактерий [6]. Дело в том, что значение энергии возбуждения первого разрешенного триплетного состояния для фуллероидов — 1,63 эВ, что как раз соответствует числовому значению энергии первого метастабильного сингулетного состояния для молекулы кислорода. При этом способ возбуждения нанокластеров углерода фуллероидного типа несущественен, это может быть и фотовозбуждение лазерным излучением либо солнечным светом или возбуждение световым излучением, например, высокотемпературного пламени.

Таким образом, сингулетно-возбужденный O<sub>2</sub> может быть использован, например, для биологической защиты памятников культуры с применением метода фотодинамической самостерилизации (нанокатализаторами в этом случае могут служить растворимые аддукты фуллероидов). Однако перечень эффективного использования метода фотодинамической генерации сингулетно-возбужденного кислорода отнюдь не ограничивается медико-биологическими технологиями.

При активации твердого топлива добавки нанокластеров углерода фуллероидного типа, являясь средством генерации сингулетно-возбужденного кислорода, служат катализаторами интенсификации процессов горения. Возможностями создания новой технологии модификации твердого топлива и посвящена настоящая работа.

#### Создание испытательного стенда

Для лабораторных испытаний твердого топлива был создан стенд (рис. 4). Основой такого стенда является камерная высокотемпературная электропечь ПЛ/15 (16), рассчитанная на работу в воздушной среде на максимальную температуру 1600 °С.

Стенд (рис. 5) позволил исследовать эффекты наномодификации топлива и сопоставить результаты эксперимента с расчетами и математическим моделированием процессов горения.

Начата апробация разработанной технологии на опытно-промышленной установке экспериментальной ТЭС (бывшей Несветай ГРЭС, г. Красный Сулин, Ростовская область).

Корректировка известной математической модели горения позволила учесть влияние нанодобавок на изменение физико-химических характеристик топлива, а также на процессы его воспламенения и го-



Рис. 4. Принципиальная схема испытательного стенда:

1 — рабочая камера печи; 2 — высокотемпературная электропечь; 3 — измеритель-регулятор двухканальный ТРМ202; 4 преобразователь интерфейсов АС4; 5 — персональный компьютер (ПК); 6 — дозатор подачи воздуха



Рис. 5. Фотография испытательного стенда



Рис. 6. Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами математического моделирования (на примере модификации топлива астраленами [7]):

*I*, *2* — уголь 2 г + 5 мл астралена; *3* — кривая математического моделирования

рения. Эта корректировка проведена с помощью поправочных коэффициентов, полученных на основе экспериментальных данных.

Результаты сравнения откорректированной модели с результатами огневых испытаний иллюстрируются рис. 6 на примере модификации топлива астраленами [7]. Большой массив аналогичных результатов сравнений демонстрирует хорошее совпадение предсказанных и экспериментально подтвержденных результатов наномодификации, полученных с помощью охарактеризованного выше стенда.

## Выводы

Анализ публикаций и патентного поиска показал, что в настоящее время ни в России, ни за рубежом не имеется технологий, подобных охарактеризованным в настоящей статье. Зарубежный опыт использования установок для подготовки топлива с заданными характеристиками нам не известен.

Результаты создания экологически чистой комплексной технологии наномодификации твердого топлива применимы для котлов тепловых электростанций, а также промышленных и отопительных котельных, там где используется низкореакционное твердое топливо, которое требует дополнительных затрат и усилий для воспламенения и горения (например, "подсветки" факела природным газом).

Новые возможности позволяют отказаться полностью или частично от "подсветки" топлива в котлах ТЭС, снизить расходы топлива и уменьшить вредные выбросы электростанций, не меняя традиционной конструкции котла.

Промышленное масштабирование технологии наномодификации топлива позволит существенно повысить коэффициент полезного действия ТЭС, что явится прорывом в практической теплоэнергетике.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (Государственный контракт  $N_{\odot}$  02.513.11.3369 от 30.07.2007, шифр 2007-3-1.3-00-04-057).

#### Список литературы

1. **Mulliken R. S.** Interpretation of the atmospheric oxygen bands; electronic levels of the oxygen molecule // Nature. 1928. Vol. 122. P. 505.

2. Schweitzer C., Schmidt R. Physical Mechanisms of Generation and Deactivation of Singlet Oxygen // Chemical Reviews. 2003. Vol. 103 (5). P. 1685–1757.

3. **Karp G.** Cell and Molecular Cell Biology concepts and experiments. Fourth Edition, 2005. 223 p.

4. Grether-Beck S., Buettner R., Krutman J. Ultraviolet A radiation-induced expression of human genes: molecular and photobiological mechanism // Bio. Chem. Vol. 378. N 1997. P. 1231–1236.

5. URL: http://www.airnergv.ru/publication/?sub chapter = 53. 6. Способ фотодинамического воздействия на вирусы и

клетки. Патент РФ № 2291700, приоритет от 20 ноября 2002 г. 7. Астралены®. Патент РФ № 2196731, ТУ 2166-004-13800624-2004. URL: http://www.nanoteh.ni/prod now.html.

8. **Таунит.** URL: http://www.itlicorp.com/news/1830.

# Материаловедческие и технологические основы МНСТ

# УДК 621.791.3

**В. Н. Штенников**, канд. техн. наук, зам. нач. упр., ФГУП УЭМЗ, г. Екатеринбург, e-mail: shtennikov@uemz.ru

# УТОЧНЯЕМ МЕЖДУНАРОДНЫЙ СТАНДАРТ МЭК

Изложены предложения по уточнению международного стандарта IEC (МЭК) 61192-1 "Процесс пайки". В связи с отсутствием современной отечественной нормативной базы по пайке электронных компонентов наибольшее распространение получили международные стандарты IPC и IEC [1].

**Ключевые слова:** стандарт, электронный прибор, качество, пайка

На российском рынке наиболее известными нормативными документами в области конструирования и производства печатных плат и электронных сборок являются стандарты IPC — Association Connecting Electronics Industries. Вторую позицию уверенно занимают международные стандарты IEC — International Electrotechnical Commission.

В работе [2] приведен технический перевод международного стандарта IEC (МЭК) 61192-1 "Процесс пайки". Ниже приводятся предложения по уточнению данного международного стандарта.

В упомянутой статье [2] неоднократно используется словосочетание "тепловая масса". Правильнее писать "теплоемкость". Понятно, что данное замечание относится к переводу, а не к стандарту.

На странице 51 в 20-й строке сверху первого столбца вместо "плавка" следует записать "пайка", а словосочетание "кондуктивный теплообмен" в 24-й строке того же столбца заменить "конвекцией", что также является следствием неточного перевода.

Кроме того, необходимо словосочетание "латентную теплоту" в 1-й строке 2-го столбца на 51 стр. заменить на "скрытую теплоту парообразования". На стр. 52 в 37-й строчке вместо "перед тем, как" должно быть "после того, как".

В разделе "Управление технологическим процессом" на стр. 52, в 3-м столбце термин "спецификация" необходимо поменять на слово "требования".

В разделе "Машинные регулировки" на стр. 52, в 3-м столбце вместо "Сборочный завод" лучше, по нашему мнению, указать: "предприятие-изготовитель печатных узлов".

В разделе "Пайка оплавлением" нельзя согласиться с мнением о том, что для перечисленных методов пайки определяющими характеристиками являются: "оплавление", отсутствие "физического контакта между источником тепла и сборкой": инфракрасная, конвекционная, лазерная, в паровой фазе, электродами, струей газа.

Действительно, во-первых, оплавление происходит как при перечисленных в разделе методах пайки: контактной, конвекционной, лазерной, инфракрасной, парофазной, параллельными электродами и т. д., так и при пайке погружением, волной припоя, контактной пайке паяльником или автоматом.

Во-вторых, физического контакта с нагревателем, как при пайке паяльником, погружением или волной припоя действительно нет, но физический контакт с теплоносителем (нагретым газом) имеется.

Автору статьи больше нравится объединение методов пайки по видам нагрева паяных соединений: контактная пайка, включая пайку волной припоя, погружением в ванну с припоем, селективную пайку струей припоя; инфракрасная пайка, включая лазерную; конвекционная пайка, включая пайку струей газа, пайку в паровой фазе.

В-третьих, в стандарте не упомянута пайка нагретым газом, предполагающая размещение печатного узла в конвекционную печь с одной зоной разогрева и без вынужденной конвекции (с выключенным вентилятором в этой зоне), в которой используется свободная конвекция [3].

В части температурного профиля пайки, по-нашему мнению, вместо фразы "температурно-временной профиль, позволяющий осуществлять пайку каждого компонента на плате в диапазоне максимальных пределов температурно-временного воздействия" лучше записать: "температурный профиль, обеспечивающий необходимое качество пайки, с одной стороны, и отсутствие перегрева термочувствительных компонентов, — с другой".

В части различного нагрева мелких и крупных компонентов при конвекционной пайке, с учетом работы [4] следует учитывать, что интересующий перепад температуры зависит не только от теплоемкости компонентов, но и от обдуваемой площади их поверхности, от теплоемкости печатной платы и от метода креплений компонентов к ней. При проверке воспроизводимости температурного профиля на "горячих" и "холодных" участках печатного узла применение печатной платы без компонентов не корректно. Расхождения будут тем больше, чем меньше время нагрева, больше скорость обдува газом, а температура печатного узла далека от температуры нагретого газа.

Необходимо отметить, что при дополнительном использовании инфракрасного излучения опасность перегрева "черных" мелких компонентов, а также цена оборудования существенно возрастают. Вместе с тем скорость нагрева компонентов может быть существенно повышена.

По пайке в паровой фазе необходимо отметить следующее. Метод отличается примерно на порядок бо́льшим коэффициентом теплоотдачи, чем при конвекционной пайке, что в большинстве случаев не обеспечивает требуемого постепенного нагрева.

По-нашему мнению, вместо предварительного инфракрасного нагрева необходимо использовать конвекционный нагрев. Еще более эффективным может оказаться метод нагрева в паре неконденси-

рующихся газов (воздух, азот), существенно уменьшающих коэффициент теплоотдачи. Так, при массовом содержании воздуха в водяном паре в количестве 0,5 % коэффициент теплоотдачи снижается в 2 раза [5].

По поводу лазерной пайки следует отметить, что кроме импульсного может быть использован и лазер непрерывного излучения. Поэтому в 7-й строке снизу второго столбца стр. 51 лучше записать не "Импульсный лазерный луч используется для сканирования последовательных выходных контактов или выводов на одном компоненте для подачи одинаковой энергии на бугорки припоя с целью их одновременного расплавления", а "Лазерный луч используется для последовательной пайки выводов компонентов; при этом возможна регулировка мощности излучения в процессе пайки в зависимости от величины нагрева".

Оценка "теплопроводности между выводом и платой" по результатам охлаждения паяных соединений эффективна только в случае занесения результатов в память установки и введения соответствующей корректировки при повторной пайке одноименных плат. Кроме этого, более корректно вместо терминов "теплопроводность" и "теплоемкость" контактных площадок говорить об их теплопоглощении, так как упомянутый параметр зависит от времени пайки: чем время пайки больше, тем больше теплопоглощение контактных площадок вследствие прогрева все более удаленных участков [6].

С учетом попыток минимизировать время лазерной пайки уместно, по нашему мнению, ввести предупреждение о том, что уменьшение времени пайки, в первую очередь это касается лазерной и контактной пайки, приводит к увеличению перепада температуры по глубине паяного соединения [7].

По мнению автора настоящей статьи, пайка электродами не дает каких-либо преимуществ по отношению к другим видам пайки: исключает групповые методы, предполагает введение операции внесения припоя, использует не смоченные припоем контакты, что предопределяет нестабильность характеристик как по электрическим параметрам, так и по теплопередаче [8].

В разделе "Пайка многоструйным газовым оплавлением" записано: "Установку следует проектировать с учетом минимизации тепла, подаваемого на корпус компонента во время пайки". Упомянутый абзац необходимо исключить, так как он не содержит требований по выполнению каких-либо действий, а формулирует только желание, причем излишне конкретизированное. Указание о том, что "температурно-временную последовательность" следует программировать, необходимо изложить, например, в следующей редакции: температурный профиль пайки следует отрабатывать в соответствии с рекомендациями производителя паяльной пасты и требованиями производителей компонентов, рекомендациями настоящего стандарта. Контроль за образованием "уровня прироста интерметаллидов" на паяных соединениях соседних компонентов ввиду опасности попадания на них струи газа излишен, так как опасность их образования в значительно большей степени возникает на монтируемых компонентах. Кроме того, опасность перегрева монтируемых компонентов, по нашим данным, также возникает гораздо раньше, чем образование слоя интерметаллида, оказывающего существенное влияние на качество паяных соединений. И, наконец, непонятно, как контролировать рост интерметаллидов во время пайки.

Замечание о "температурно-временном цикле" необходимо распространить на все другие методы пайки.

В разделе "Нанесение флюса при пайке погружением" необходимо вместо словосочетания "тепловая масса" записать "теплоемкость", что, в свою очередь, в первом приближении, в связи с необходимостью учета и площади поверхности, можно заменить на слово "размеры". Рекомендации по учету "черноты" компонентов, во-первых, необходимо применять только в случае инфракрасного нагрева, а во-вторых, следует учитывать, что черный цвет в видимом спектре не обязательно соответствует поверхности с максимальным поглощением инфракрасного излучения.

В разделе "Содержимое ванны с припоем" вместо "..., риск загрязнения припоя выше ..." необходимо записать: "..., припой меняет свой состав за счет растворения контактирующих с ним покрытий печатных плат и компонентов, оборудования".

В разделе "Паяльники" необходимо исключить фразу: "Во избежание повреждения компонентов паяльники следует выбирать в соответствии с размерами и тепловой массой паяемых выходных контактов", по ряду причин.

Во-первых, снижение температуры паяющего конца длинного паяльного стержня постоянного диаметра при контакте с проводом пропорционально температуре пайки, отношению площадей поперечного сечения провода и стержня, пропорционально отношению коэффициентов теплоусвоения материала провода и стержня, соответственно [9]. В частности, медный паяльный стержень постоянного диаметра можно считать длинным, если его длина больше 2,5 см при времени пайки менее 2,5 с.

Во-вторых, температура пайки при выполнении одного паяного соединения не зависит от наличия терморегулятора, мощности, теплоемкости и тепловых условий контакта паяльного стержня с корпусом паяльника, если паяльный стержень достаточно длинный (см. выше). Температура паяющего конца короткого паяльного стержня, имеющего термостабилизированный непаяющий конец (терморегулятор), во время контакта с типичным паяным соединением (проводом) растет в течение всего времени пайки. Увеличение температуры пайки тем больше, чем короче паяльный стержень, больше коэффициент температуропроводности материала паяльного стержня [10].

Ограничения по максимальному диаметру паяльного стержня, мощности паяльного инструмента в разделах "Паяльники для поверхностного монтажа", "Паяльники для компонентов штыревого монтажа" не обоснованы. Соответствующие пояснения и рекомендации содержатся в работах [11, 12]. Значения по температуре холостого хода для пайки компонентов в отверстия печатных плат с учетом рекомендуемого диаметра паяльного стержня — 6,5 мм существенно завышены, как по данным автора с позиции оптимального температурно-временного режима [12], так и по данным авторов работы [13] с точки зрения гарантированного исключения образования интерметаллида типа Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> толщиной более 0,5 мкм.

Совершенно не обоснованным выглядит положение о запрещении использования универсального паяльного инструмента для монтажа в отверстия печатных плат или поверхностного монтажа, что подтверждается всеми известными фирмами-производителями паяльных станций, рекомендующих применение как стандартных паяльных стержней, так и паяльного стержня типа "мини-волна" для пайки планарных выводов электронных компонентов. По этой же причине нельзя согласиться с утверждением о недопустимости применения паяльников для компонентов, устанавливаемых на паяльную пасту.

Рекомендации стандарта в разделе "Пайка безвыводных керамических конденсаторов ..." по пайке паяльником, на взгляд автора статьи, противоречат требованию предыдущих разделов стандарта о недопустимости использования паяльников, предназначенных для традиционного монтажа компонентов в отверстия печатных плат. Рекомендуемые приемы работы не воспроизводимы, трудно осуществимы и не контролируемы. По нашему мнению, для снижения риска повреждения безвыводных компонентов их необходимо монтировать методами конвекционной или парофазной пайки либо их предварительным нагревом, либо струей горячего газа. В силу сложности обеспечения и контроля температуры пайки ввиду меняющегося расстояния до компонента и скорости обдува газом, метод больше подходит для демонтажа и меньше для монтажа компонентов.

В разделе "Нанесение припоя" фразу: "температура паяльника не должна превышать заданную рабочую температуру используемого припоя" необходимо исключить как не обоснованную.

В раздел "Теплоотводы" можно ввести следующие рекомендации по увеличению эффективности теплоотвода [14]:

- увеличивать расстояние между паяным соединением и корпусом компонента;
- сокращать время пайки за счет предварительного лужения при типовых режимах, таким образом обеспечив образование требуемого диффузионного слоя и, следовательно, прочность паяного соединения;
- обеспечивать максимальную площадь фактического контакта теплоотвода с выводом компонента, например, путем введения жидкого или мягкого металла, флюса;
- использовать теплоотвод с максимальной площадью поперечного сечения "губок";
- максимально приближать теплоотвод к корпусу компонента; размещение теплоотвода около паяного соединения приведет к необходимости поднять температуру паяльного стержня между пайками и (или) его диаметр, чтобы сохранить температуру пайки и, таким образом снизит эффективность теплоотвода.

#### Список литературы

1. **Медведев А.** Болезни отечественной стандартизации в электронике // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 3. С. 4—6.

2. **Круглова Л.** Стандарт IPC (МЭК) 61192-1 "Процесс пайки" // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 1. С. 50-55.

3. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сухомел А. С. Теплопередача. Изд. 2-е. М.: Энергия, 1969. 440 с.

4. Штенников В. Н. К вопросу развития научного направления по пайке электронных приборов // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 3. С. 30—31. 5. Жуковский В. С. Основы теории теплопередачи.

5. Жуковский В. С. Основы теории теплопередачи. Л.: Энергия, 1969. 224 с.

6. Штенников В. Н. Зависимость снижения температуры паяющего конца стержня паяльника во время пайки от его диаметра, материала и температуры холостого хода // Организация производства и прогрессивная технология в приборостроении. 1981. № 3. С. 16.

7. Штенников В. Н. Проблемы минимизации времени контактной и лазерной пайки // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 2. С. 18–20.

8. Шлыков Ю. П., Ганин Е. А. Контактный теплообмен. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 144 с.

9. Штенников В. Н. Связь конструктивных и теплофизических параметров паяльника // Организация производства и прогрессивная технология в приборостроении. 1981. № 2. С. 23.

10. Штенников В. Н. Оценка перспективности печатных плат // Приборы. 2008. № 9. С. 43—45.

11. Штенников В. Н. Паяльные стержни в рекомендациях международных стандартов IPC // Приборы. 2009. № 7. С. 41—43.

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

13. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Контактные металлургические процессы при пайке. М.: Металлургия, 1977. 192 с.

14. Штенников В. Н. Влияние длины стержня паяльника на снижение температуры его паяющего конца при одиночной пайке // Организация производства и прогрессивная технология в приборостроении. 1981. № 9. С. 19.

# УДК 53.01;536.631

В. Ф. Коростелев, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Владимирский гос. ун-т, e-mail: gilss300@mail.ru, Л. П. Хромова, канд. техн. наук, ген. директор НПЦ "ИНОР", г. Королев, Московская обл.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖАТОМНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ

Приведены результаты экспериментальных исследований сплавов на основе алюминия, полученных в условиях литья с опрессовкой жидкого и кристаллизующегося металла под давлением до 400 МПа. Показано, что наложение давления приводит не только к сближению атомов и компенсации литейной усадки, но и к изменению структуры. Анализ закономерностей изменений свойств дает информацию о развитии процессов на уровне атомно-электронных взаимодействий, существенно расширяющую возможности синтеза новых материалов.

Ключевые слова: плотноупакованные атомные структуры, процесс кристаллизации под давлением, показатели твердости, модуля Юнга, упругого восстановления, теплоемкость как функция от температуры, дилатометрия, оценки силы межатомных связей

В качестве одного из возможных подходов к производству наноструктурированных материалов в работе [1] предложено воздействовать на отдельные атомы и их ассоциации давлением, накладываемым на расплав до начала кристаллизации. В той же работе предложены схемные технические решения, направленные на практическую реализацию указанного подхода. Система управления процессом и результаты исследований сжимаемости и упругих свойств расплава приведены в работе [2].

Целью данного исследования является накопление и углубление знаний о структурно-фазовых превращениях, в которых проявляются эффекты межатомных взаимодействий и создание на этой основе более эффективных систем автоматического управления формированием наноструктур с требуемыми свойствами.

# Оценка состояния проблемы

Предполагается [3], что более высокие свойства наноструктурированных материалов по сравнению с обычными материалами формируются в процессе компактирования наночастиц за счет образования более прочных связей между атомами, расположенными на поверхности наночастиц и имеющими так называемые ненасыщенные межатомные связи. Другой взгляд [4] не исключает возможность образования более плотноупакованных структур, в том числе с изменением параметров и типа кристаллической решетки под влиянием давления Лапласа, возникающего на поверхности наночастиц.

Следует отметить, что на сегодняшний день теоретический уровень исследований ограничивается обсуждением эмпирической информации. Предлагаемые модели межатомных взаимодействий построены на пространственно-геометрических признаках. Примером может служить модель "жестких сфер" [4].

# К возможности использования квантово-механических моделей

Как установлено в работе [2], сближение атомов под влиянием давления приводит к возникновению упругих сил отталкивания. Такие же силы возника-

Таблица 1

Химический состав опытных плавок алюминиевых сплавов

No naodku				(	Содержани	е элементо	ов, % (масс	2)			
л∾ плавки	Al	Mn	Cu	Zn	Mg	Ti	Zr	Co	Ce	Fe	Se
1	Осн.	0,4	1,7	6,0	2,3	_	_	_	_	≤0,5	≤0,5
2	Осн.	_	2,3	8,5	2,65	—	0,15	_	_	≤0,4	≤0,4
3	Осн.	1,4	4,5	7,0	2,65	0,25	0,25	_	_	≤0,3	≤0,2
4	Осн.	20	_	_		0,15	0,15	_	_	_	_
5	Осн.	0,4	1,7	6,0	2,3	0,25	0,25	_	_	_	_
6	Осн.	0,8	3,0	7,0	4,0	0,25	0,25	_	_	_	_
7	Осн.	0,8	4,0	8,0	5,0	0,25	0,25	_	_	_	_
8	Осн.	0,8	4,0	7,0	4,5	0,25	0,25	_	_	_	_
9	Осн.	0,8	5,0	7,0	4,5	0,25	0,25	—	—	-	—
										I	1

Таблица 2

Механические свойства изученных алюминиевых сплавов

№ плав- ки	Состояние	Твердость по Виккерсу HV	Модуль Юнга <i>Е</i> , ГПа	Упругое восста- новле- ние <i>R</i> , %
1	пкл	$143.63 \pm 6.3$	$95.776 \pm 6.4$	8.7
1	ПКД + от-	$202,82 \pm 20,5$	$67,50 \pm 7,0$	15,0
	жиг 520 °С — 10 ч			
2	ПКД	$178,35 \pm 10,5$	$75,991 \pm 5,9$	12,7
2	ПКД + ста-	$184,84 \pm 23,014$	$96,237 \pm 4,3$	11,0
	рение 120 °С — 12 ч			
3	ПКД	$146,05 \pm 10,3$	$92,301 \pm 7,9$	9,2
4	ПКД	$1162,20 \pm 75,48$	$173,59 \pm 7,4$	33,4
5	ПКД	$700,37 \pm 0,00$	$112,65 \pm 00$	31,9
6	ПКД	$70,88 \pm 1,5$	$67,\!64 \pm 0,\!01$	5,4
7	ПКД	$101 \pm 23,86$	$81,25 \pm 7,3$	6,7
8	ПКД	$141,08 \pm 53,4$	$94,65 \pm 4,5$	8,2
9	ПКД	$148,96 \pm 5,6$	77,44 ± 5,6	10,1

ют при сжатии упругих шаров. Но упругие шары под влиянием этих сил стремятся к наиболее плотной упаковке, в то время как атомы в металлах располагаются в узлах кристаллической решетки, в которой существует и ближний, и дальний порядок в расположении атомов. Не исключено, что в процессе кристаллизации возникают силы, связанные с движением электронов, с переходом электронов на другие энергетические уровни, чему не в малой степени может способствовать энергия упругих искажений решетки, возникающих при наложении давления. Современный уровень металлофизических исследований не позволяет определить эти силы инструментально, поэтому предлагается косвенный метод, основанный на изучении аномалий в изменении свойств сплавов.

# Характеристика опытных составов и физико-механических свойств сплавов

Состав опытных образцов, выплавку которых, как и в работе [2], проводили в индукционной печи в графитовом тигле, приведен в табл. 1. За основу принят сплав В95 (плавка № 1). Плавка № 2 соответствует сплаву В96 [5], плавка № 4 — сплаву системы Al—Mn. Другие составы выбраны из соображе-

ний исследования влияния на изменение свойств таких элементов, как Cu, Zn, Mg,Ti, Zr (табл. 2). Свойства исследованы на вырезанных из слитков образцах после осуществления кристаллизации под давлением (ПКД). Кроме того образцы плавки № 1 изучались в состоянии ПКД + отжиг, а плавки № 2 — ПКД + старение.

Для оценки уровня энергии, накопленной атомами во время кристаллизации под давлением, в качестве показателей свойств выбраны твердость по Виккерсу HV, модуль Юнга E и упругое восстановление R.

Наибольшего внимания заслуживают следующие результаты:

- высокая твердость сплава № 4 1162 ± 75 HV;
- повышение твердости сплава № 1 от 143 ± 6 HV после ПКД до 202 ± 20 HV после ПКД + отжиг 520 °С 10 ч;
- повышение твердости сплава № 5 до 700 HV, вероятно, за счет наличия 0,25 % Zr и 0,25 % Ti по сравнению со сплавом B95 (плавка № 1);
- повышение твердости до 184 ± 23 HV в сплаве № 2 после ПКД + старение 120 °С — 12 ч.

# Металлографические исследования

Фотография микроструктуры, характерной для ПКД, приведена на рис. 1 для сплава № 5. На рис.



Рис. 1. Металлография сплава (плавка № 5) в состоянии ПКД



Рис. 2. Металлография сплава (плавка № 3) в состоянии ПКД



Рис. 3. Металлография сплава (плавка № 1) в состоянии ПКД + + отжиг при *t* = 520 °С - 10 ч



Рис. 4. Металлография сплава (плавка № 1) в состоянии ПКД + + выдержка при t = 120 °С - 4 ч



Рис. 5. Металлография сплава (плавка № 1) в состоянии ПКД + + выдержка при *t* = 120 °С - 8 ч

2 подобная микроструктура приведена для сплава № 3. В отличие от структуры сплавов системы Al—Cu— Zn—Mg, поставляемых в деформированном состоянии [5], здесь не выявлены границы зерен; металлическая основа представляет собой чистое поле, на котором располагаются фазы, форма и размеры которых фиксируют состояние сплава после ПКД.

Условно будем называть ровные поля дендритными ячейками (ДЯ), а отдельные участки — избыточными фазами (ИФ).

ДЯ, в свою очередь, представляют твердый раствор Cu, Mg, Zn и др. в Al, в то время как  $И\Phi$  — это в основном интерметаллиды.

Следует подчеркнуть, что после ПКД, т. е. после наложения давления до 400 МПа и охлаждения в металлической форме со скоростью 30...40 К/мин, сплавы, взятые в рассмотрение, находятся с сильно неравновесном состоянии.

Отжиг при t = 520 °C — 10 ч приводит к растворению ИФ в ДЯ и образованию полостей, разделяющих твердый раствор (рис. 3).

Старение при t = 120 °С — 4 ч приводит к уменьшению площади, занимаемой ИФ и появлению в ДЯ вкраплений вновь образующихся фаз (рис. 4). Увеличение выдержки во время старения до 8 ч приводит к гомогенизации твердого раствора, к частичному исчезновению ИФ и образованию на месте их залегания складок и полостей (рис. 5).

# Исследования теплоемкости

Известно, что зависимость теплоемкости чистых металлов от температуры имеет линейный или близкий к нему характер. Отклонения от этой зависимости у сплавов могут быть обусловлены фазовыми, магнитными и другими превращениями. Поэтому исследования непрерывного изменения теплоемкости в интервале температур от комнатной до температуры плавления могут дать информацию о внутренних процессах, включая и межатомные взаимодействия.

Сплав № 1, как видно на рис. 6, имеет сложную зависимость  $C_p(t)$ . Обращают на себя внимание аномалии при температурах 100...130 °С и в интервале 470...480 °С, причем наличие явно выраженного максимума вправе связать с фазовыми превращениями II рода, т. е. с процессом упорядочения во взаимном расположении атомов [4].

У других сплавов характер зависимости  $C_p(t)$  позволяет выявить важные особенности. Так, сплав № 4 имеет монотонную зависимость (рис. 7), в то время как у сплава № 5 отмечается несколько пиков (рис. 8).

Сравнение зависимостей, полученных на образцах одного и того же состава (рис. 9), показывает, что кривая  $\delta$  смещается вниз по отношению к кривой *a*, из чего следует, что старение приводит к формированию более равновесной структуры, по сравнению с исходным состоянием после ПКД.



Рис. 6. Зависимость теплоемкости ( $C_p$ ) от температуры сплава  $\mathbb{N}_2$  1





Рис. 8. Зависимость теплоемкости ( $C_p$ ) сплава  $\mathbb{N}$  5 от температуры



Рис. 9. Зависимость теплоемкости сплава № 1 от температуры: a — исходная после ПКД;  $\delta$  — ПКД + старение при 120 °С — 12 ч





НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 2, 2010 -

Анализ зависимостей теплоемкости сплавов от температуры наводит на предположение, что фазовые превращения зависят от силы межатомных связей. У сплава № 4 связь ковалентная, потому в интервале 0...600 °С структура не изменяется.

Наибольший интерес представляет график на рис. 10, построенный для чистого алюминия, который показывает, что наложение давления "до" и "в процессе" кристаллизации приводит к изменению характера зависимости, причем первый пик, как и на рис. 6, 8, 9, отмечается при достаточно низкой температуре (140 °C). Возможно, кристаллическая решетка алюминия под влиянием энергии искажений во взаимном расположении атомов способна к изменению пространственно-геометрической конфигурации, что и приводит к изменению теплоемкости.

## Термодинамика межатомных взаимодействий

Температуру, соответствующую максимуму на кривой теплоемкости, принято называть температурой Курнакова [4].

Для бинарного сплава из атомов *А*—*В* энергия межатомных взаимодействий

$$U = ZU_{AB} + (Z - 1)U_{AB} = (2Z - 1)U_{AB},$$

где *Z* — координационное число; *U*<sub>AB</sub> — энергия взаимодействия соответствующих атомов.

Обозначим  $\sigma$  — степень дальнего порядка в расположении атомов. Тогда состоянию  $\sigma = 1$  соответствует упорядоченное расположение атомов, состоянию  $\sigma = 0$  — полностью разупорядоченное.

Изменение потенциальной энергии в результате смещения атомов составит

$$\Delta U(\sigma) = U(\sigma) - U(\sigma = 1) =$$
$$= -\frac{NU_0}{4} \int_{1}^{0} \sigma d\sigma = \frac{NU_0}{8} (1 - \sigma^2),$$

где N — общее число атомов;  $U_0$  — энергия упорядочения.

Изменение энтропии при этом составит

$$\Delta S(\sigma) = S(\sigma) - S(\sigma = 1).$$

Вместе с тем, энтропию можно связать с вероятностью расположения атомов. Если принять, что  $S = k \ln P_A P_B$ , где k — постоянная Больцмана,  $P_A$  — число способов размещения атомов A в подрешетке A, а  $P_B$  — число способов размещения атомов B в подрешетке B, то изменение свободной энергии составит

$$\Delta F(\sigma) = \Delta U(\sigma) - T \Delta S(\sigma).$$

Отсюда температура Курнакова

$$T_{\rm K} = \frac{Z \Delta U}{2 \rm K}.$$

Данное соотношение в работе [4] представлено для случая упорядочения, протекающего как фазовое превращение II рода. И хотя в многокомпонентных сплавах типа сплава B95 характер взаимного расположения атомов более сложный, значение температуры  $T_{\rm K}$ , тем не менее, указывает на важную роль энергии и прежде всего энергии упругих искажений кристаллической решетки, являющейся, по существу, движущей силой фазовых превращений.

# Дилатометрические исследования

Важным условием фазового превращения является также кристаллогеометрическое соответствие "старой " и "новой" фаз, которое достигается при термическом изменении межатомных расстояний. С этой точки зрения представляют интерес зависимости температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и удлинения образца от температуры (рис. 11).

Сравнение графиков на рис. 6 и 11 указывает на их сходство и полное совпадение по температуре 480 °С, соответствующей пику на кривых  $C_p(t)$  и  $\Delta l(t)$ , откуда следует, что фазовое превращение со-провождается аномальным изменением межатомных расстояний.

Не исключено, что термическое изменение размеров приводит к ослаблению сил межатомной связи, что в свою очередь инициирует образование новых фаз, а во время формирования их структуры линейные и объемные размеры изменяются скачкообразно.

# Механизм и кинетика кристаллизации в условиях наложения давления

Фотографии микроструктур на рис. 1—5 не раскрывают причин ИФ. Предположение о том, что эти фазы выпадают из твердого раствора во время охла-



Рис. 11. Зависимость ТКЛР (α) (сплошная кривая) и удлинения (Δ*l*) (пунктирная кривая) от температуры сплава № 1

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 2, 2010 -



Рис. 12. Измерение концентрации Cu, Mg, Zn в сечении дендритной ячейки

ждения слитка, не лишено основания. Нагрев до 520 °С приводит к растворению ИФ в ДЯ (см. рис. 3). Тогда возникает вопрос о возможности достижения такого состояния, при котором при комнатной температуре будет зафиксирован однородный пересыщенный твердый раствор.

Обратимся к определению концентрации элементов Cu, Mg, Zn на границах (ГДЯ) и в центре (ЦДЯ) дендритных ячеек. Схема измерений приведена на рис. 12.

В табл. 3 сведены результаты расчетов, которые указывают на различие концентраций, на более высокую концентрацию элементов у ГДЯ.

Такое распределение может происходить при условии, что ДЯ возникает из центра кристаллизации. Формы границ ДЯ на рис. 1—5 не противоречат этому предположению. Центры растут по мере снижения температуры, на удалении от центра концен-

Результаты расчетов концентраций элементов									
Эле-		Зерно 1			Зерно 2				
мент	ГДЯ 1	ЦДЯ 1	ГДЯ 1	ГДЯ 2	ЦДЯ 2	ГДЯ 2			
Cu	1,92	0,70	0,92	1,39	0,85	1,22			
Mg	1,86	1,72	1,81	1,86	1,72	1,81			
Zn	5,61	4,15	5,96	6,02	3,76	5,62			

Таблица 3

трация элементов в твердом растворе будет повышаться, а выравнивание концентраций в условиях достаточно быстрого охлаждения не может быть достигнута. Отсюда следует, что уровень давления 400 МПа не обеспечивает создание неравновесного состояния, при котором кристаллизация происходит одновременно во всем объеме.

# Выводы

- Наложение давления до начала и в процессе кристаллизации обеспечивает получение качественных образцов с высокими показателями упругих свойств, что свидетельствует о более сильных межатомных связях.
- Возможность повышения термической стабильности структуры и упругих свойств сплавов зависит от типа связей между атомами; химическая и ковалентная связи, в отличие от металлической, исключают промежуточные фазовые превращения, тем самым способствуют сохранению упругих свойств на более высоком уровне и в более широком температурном диапазоне.
- Для создания материалов с более высоким уровнем свойств может быть предложено ПКД, при котором уровень накладываемого давления и скорость охлаждения до комнатной температуры обеспечивают формирование структуры однородного пересыщенного раствора, а требуемое сочетание прочностных, упругих и пластических свойств достигается подбором режимов закалки и старения.

#### Список литературы

1. **Коростелев В. Ф.** Технология и управление формированием нанокристаллического строения изделий из прецизионных сплавов // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 10. С. 14—17.

2. Коростелев В. Ф., Хромова Л. П., Рассказчиков А. Н. Управление процессом кристаллизации сплава В95 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 8. С. 18—24.

3. Гусев А. И., Ремпель А. А. Нанокристаллические материалы. М.: Физматгиз, 2001. 328 с.

4. Ягодкин Ю. Д., Свиридова Т. А. Атомное строение фаз. Кристаллохимия твердых растворов и промежуточных фаз. Структура аморфных, квазикристаллических и нанокристаллических материалов: Курс лекций. М.: МИСиС, 2007. 107 с.

5. Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: Учеб. для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. М.: МИСиС, 1999. 416 с.



УДК 681.586.728

О. С. Бохов, А. П. Бройко, канд. техн. наук, доц., А. В. Корляков, канд. физ.-мат. наук, доц., В. В. Лучинин, д-р техн. наук, проф., Центр микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ", e-mail: cmid@eltech.ru

# МИКРОСЕНСОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Существующие чувствительные элементы для измерения давления ниже атмосферного обладают узким диапазоном измерения, высокой погрешностью и ограниченным сроком службы, что связано как с конструктивными, так и с методическими особенностями датчиков. Предложена методика, основанная на исследовании периодического теплового режима в работе терморезисторного сенсора, позволяющая повысить чувствительность и снизить погрешность, а также уменьшить инерционность чувствительных элементов за счет измерения временных, а не амплитудных параметров сигнала.

**Ключевые слова:** терморезистивный, МЭМС, микросенсор, давление, периодический

#### Введение

Существующие тепловые преобразователи давления имеют высокую погрешность, ограниченные диапазон измерения и срок службы. Их наибольшая чувствительность и наименьшая погрешность измерения находятся в области среднего вакуума. Принцип действия тепловых преобразователей основан на зависимости теплопередачи через газ от давления, передача теплоты происходит от тонкой металлической нити к стенкам, находящимся при комнатной температуре [1]. Теплоотдача в газ зависит от коэффициента теплопроводности газа, который, в свою очередь, зависит от давления. В области низкого вакуума теплопроводность слабо зависит от давления. В области высокого вакуума теплоотдача в газ резко уменьшается, и теплоотвод осуществляется по элементам конструкции. При этом рабочий элемент нагревается до высоких температур, что приводит к деградации материала и дрейфу характеристик чувствительного элемента.

Предлагаемая методика измерения и миниатюризация чувствительного элемента позволяют избежать нагрева до высоких температур в области низкого и среднего вакуума за счет изменения временных, а не амплитудных параметров сигнала, а значит, можно расширить диапазон и повысить точность измеряемых давлений. Применение SiC увеличивает срок службы и позволяет работать с химически активными газами.

# Физические основы методики измерения

В газовой среде на некотором расстоянии друг от друга находятся резистивный нагреватель и датчик температуры. Резистивный нагреватель можно представить как объемный источник тепловой мощности [2] с постоянной и переменной составляющими:

$$q_V = q_0 + q_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{t_0}\right),$$
 (1)

где t — время, с;  $t_0$  — период колебания, с;  $q_V$  — объемная тепловая мощность, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_0$  — постоянная составляющая объемной мощности;  $q_1$  — амплитуда переменной составляющей объемной мошности.

Температура излучателя будет периодически изменяться вблизи некоторой средней температуры благодаря наличию переменной составляющей источника объемной мощности.

При решении уравнения нестационарной теплопроводности

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + q_V, \qquad (2)$$

где c — удельная теплоемкость, Дж/кг · К;  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>; T — температура, К;  $\lambda$  — теплопроводность, Вт/м · К; x — координата, м, получается зависимость, определяющая распространение температурных колебаний от источника в пространстве и времени [2]:

$$T = T_{\max} \mathbf{e}^{-\sqrt{\frac{\pi}{a(p)t_0}x}} \cos\left(\frac{2\pi t}{t_0} - \sqrt{\frac{\pi}{a(p)t_0}x}\right), \quad (3)$$

где  $T_{\text{max}}$  — максимальная амплитуда колебания температуры излучателя относительно средней точки;  $a(p) = \frac{\lambda(p)}{c\rho(p)}$  — температуропроводность; p — давле-

Поскольку приемник находится на некотором расстоянии от излучателя, то изменение температу-

— НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 2, 2010 —

ры приемника во времени будет отставать от изменения тепловыделения в излучателе. Это время имеет три составляющие:

- запаздывание во времени, связанное с тепловой инерционностью излучателя [3] t<sub>q</sub> = C<sub>T</sub>(p)R<sub>T</sub>(p), где R<sub>T</sub> суммарное тепловое сопротивление системы; C<sub>T</sub> суммарная теплоемкость системы;
- запаздывание во времени, связанное с теплоинерционностью газа, так как для любого расстояния x, в том числе и на поверхности, колебания температуры имеют один и тот же период, однако на расстоянии x от поверхности колебания запаздывают во времени [1]:

$$t_{\rm T} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{t_0}{a(p)\pi}} x,$$
 (4)

где *t*<sub>0</sub> — период колебания;

запаздывание во времени, связанное с тепловой инерционностью приемника t<sub>пр</sub>.

Суммарное время запаздывания определяется как

$$\Delta t = t_q + t_{\rm T} + t_{\rm np}.$$

Поскольку суммарное время запаздывания зависит от теплопроводности, плотности и теплоемкости газа [5], а они, в свою очередь, — от давления, то при изменении давления будут меняться амплитуда и время запаздывания тепловых колебаний.

# Структура сенсора и принцип его работы

Электрическая схема преобразователя (рис. 1) состоит из измерительной мостовой схемы и двух резистивных нагревателей, причем каждый нагреватель располагается рядом с терморезистором мостовой схемы на тонкой балке (условно выделено прямоугольной рамкой).

Симметричность электрической схемы позволяет обеспечить температурную компенсацию измерений.





Рис. 2. Зависимость температуры нагревателя от времени



На один из входов подается переменное напряжение

$$U_{\text{BX1, 2}} = U_0 + U_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{t_0}\right)$$

где  $U_0$  — постоянная составляющая;  $U_1$  — переменная составляющая, причем  $U_0 \gg U_1$ . Выделение джоулевой теплоты приведет к изменению температуры поверхности нагревателя (*R*3, *R*4) (рис. 2).

Вследствие этого распространение температурных колебаний от нагревателя (R3, R4) в пространстве и времени вызовет изменение сопротивления резисторов мостовой схемы (R1, R2). Изменение напряжения на выходе мостовой схемы будет определятся выражением

$$U_{\rm Bbix} = U^{=} + U_{A}(p) \cos\left(\frac{2\pi(t + \Delta t (p))}{t_{0}}\right),$$

где  $U^{=}$  — постоянная составляющая;  $U_{A}$  — переменная составляющая.

Расчетный график, представляющий зависимость времени запаздывания от давления, приведен на рис. 3.

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 2, 2010 -

# Технология изготовления чувствительного элемента

На лицевую и обратную стороны кремниевой пластины осаждается  $Si_3N_4/SiO_2$ . Затем наносится резистивный слой SiC и токопроводящий слой Ni с подслоем Ti. На следующем шаге фотолитографии по Ni/Ti формируются токопроводящие соединения сенсора. Затем осуществляется травление карбида кремния с последующей пассивацией  $Si_3N_4$ . Далее

следует травление  $Si_3N_4$  (формирование топологии микробалок), и анизотропное травление Si ("освобождение" микробалок).

В таблице представлено краткое описание технологического процесса для изготовления микросенсора.

Фотографии изготовленного чувствительного элемента датчика вакуума приведены на рис. 4 (см. четвертую сторону обложки).



# Экспериментальное исследование предлагаемой методики

На вход 1 (см. рис. 1) подавался сигнал с генератора Insteck GOS-620FG вида

$$U_{\rm BX} = U_0 + U_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{t_0}\right),$$

что в свою очередь соответствовало изменению, выделяемой объемной тепловой мощности на R1 (металлический нагреватель) по закону (1). Периодический нагрев области резистора R1, приводит к периодическому изменению температуры R2 (терморезистор на основе пленок SiC). На выходе измерительной мостовой схемы измеряется напряжение разбаланса, соответствующее изменению температуры терморезистора R2. Оба сигнала выводились на экран цифрового осциллографа Agilent 548531A, причем их амплитуды уравнивались [6]. Фазовый сдвиг в соответствии с осциллограммой на рис. 5 (см. четвертую сторону обложки) составляет около 2 мс.

Время запаздывания, рассчитанное по формуле (4), для давления газа  $10^5$  Па (нормальное атмосферное давление) и расстояния между нагревателем и датчиком температуры 120 мкм составляет 2,3 мс, а из эксперимента (рис. 5) видно, что время запаздывания 2 мс.

Расхождение с экспериментом объясняется тем, что в теоретической тепловой модели (3) учитывается теплопередача до источника только через газ [4].

#### Заключение

В результате экспериментального исследования и теоретических оценок показано, что применение

методики измерения на основе периодического теплового режима за счет измерения временных, а не амплитудных параметров сигнала позволяет улучшить основные показатели датчиков — снизить погрешность и уменьшить инерционность измерений. Созданные микросенсоры способны проводить измерения в области среднего и низкого вакуума при перегреве рабочей области, не превышающей 400 К. Разработанные и реализованные чувствительные элементы могут использоваться в датчиках для измерения различных теплофизических величин давления, температуры, теплопроводности, теплоемкости, плотности, скорости течения жидкости и газа и т. д. Кроме того применение карбида кремния позволяет предотвратить деградацию в агрессивных средах, что делает возможным использование датчиков в химически экстремальных условиях.

#### Список литературы

1. **Розанов Л. Н.** Вакуумная техника: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая. школа, 1990.

2. Исаев С. И., И. А. Кожинов, Кофанов В. И. и др. Теория тепломассообмена: Учеб. для вузов / Под ред. А. И. Леонтьева. М.: Высш. школа, 1979.

3. **Кутателадзе С. С.** Основы теории теплообмена. Изд. 5-е переаб. и доп. М.: Атомиздат, 1979.

4. **Пехович А. И. и Жидких В. М.** Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976.

5. Варгафтик Н. Б., Филиппов Л. П., Тарзиманов А. А., Тоцкий Е. Е. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. М.: Энергоатомиздат, 1990.

6. **Кушнир Ф. В. и Савенко В. Г.** Электрорадиоизмерения: Учеб. пособие для вузов. Л.: Энергия, 1975.

# УДК 620.17

А. И. Воронин, аспирант,

Московский государственный институт стали и сплавов,

А. С. Осипков, аспирант,

Т. А. Горбатовская, аспирант,

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, e-mail: alexosi pkov@mail.ru

# МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ВЕТВЕЙ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ Ві<sub>2</sub>те<sub>3</sub> ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

Исследуется механическая прочность ветвей термоэлементов (ТЭ) на основе  $Bi_2Te_3$  термоэлектрических модулей (ТМ). Дается теоретическая оценка напряжений, возникающих в ветвях ТЭ в процессе эксплуатации ТМ, а также приводятся результаты экспериментального исследования прочности ветвей ТЭ. Сравнение механической прочности ветвей ТЭ, полученных различными методами (стандартные, сборные и прессованные ветви) показало, что сборные ветви имеют более высокие показатели при минимальном разбросе, что обусловлено более совершенной структурой исходного термоэлектрического материала.

**Ключевые слова:** термоэлектрические модули, ветви термоэлементов, механическая прочность

## Введение

Анализ причин выхода из строя термоэлектрических модулей (ТМ) показал, что значительное число отказов вызвано зарождением и развитием исходных технологических дефектов в виде микротрещин, увеличивающих поврежденность конструкции до критической в процессе эксплуатации. Динамика процесса изменения поврежденности конструкции ТМ обусловлена совокупным влиянием на нее экстремального термодеформационного напряженного состояния отдельных полупроводниковых ветвей, особенно в момент включения и выхода на рабочий режим, а также вероятностным фактором распределения начальной технологической дефектности паяных соединений.

Разрушение ветвей термоэлемента (ТЭ) может произойти как вследствие длительного действия переменных термосиловых нагрузок, приводящих к разрушениям материала ветвей в процессе эксплуатации ТМ (постепенные отказы), так и в результате возникновения недопустимых статических или динамических нагрузок (внезапные отказы). В обоих случаях механическая прочность отдельных ветвей ТЭ и стабильность их механических характеристик будут иметь определяющее значение для надежности всего ТМ, состоящего из цепи последовательно соединенных ΤЭ (обычно 127 или 161) [1]. И в первую очередь это касается термогенераторных модулей (ТГМ), ветви которых в процессе эксплуатации подвергаются экстремальным темосиловым возлействиям.

Целью данной работы было сравнение механической прочности ветвей ТЭ, полученных различными методами.

# Исследование структуры термоэлектрического материала

Исследование структуры термоэлектрического материала, проведенное на образцах  $(Bi_{0,25}Sb_{0,75})_2Te_3$ в форме пластин размером  $40 \times 48 \times 1,4$  мм методами рентгеновского флуоресцентного, электронномикроскопического и микрорентгеноспектрального анализа показали, что образцы имеют высокую структурную неоднородность, проявляющуюся в различиях по толщине и длине зерен. Эти различия наблюдаются и между различными областями пластин образцов. Кроме того имеют место различие в кристаллографической ориентировке зерен, что может проявляться как в микро-, так и в макрообъемах, а также наличие фрагментации зерен и возможно пор между фрагментами. Механическая обработка заготовки





Рис. 2. Изображение поперечного излома образца, полученное с помощью разных детекторов:

a — в отраженных электронах;  $\delta$  — во вторичных электронах. Наблюдаемые включения белого цвета отличаются по структуре от основного материала

приводит к появлению новых областей структурной неоднородности (рис. 1, 2).

Отмеченная структурная неоднородность материала заготовки будет оказывать негативное влияние на стабильность и уровень физических и механических свойств ветвей ТЭ.

В настоящее время ведутся активные работы по получению термоэлектрических материалов необходимой структуры и заданной геометрии, а также по созданию ветвей термоэлементов с улучшенными термоэлектрическими механическими характеристиками и повышенной надежностью.

# Оценка напряжений в ветвях ТЭ

Анализ напряжений, возникающих в ветвях ТЭ в процессе работы ТМ, показал, что данные напряжения вызваны температурными деформациями ветвей как за счет растяжения (сжатия) срединной поверхности керамических пластин (рис. 3), так и за счет ее изгиба, вызванного неравномерным нагре-





Рис. 4. К расчету реакция в связях ветвей ТЭ

вом пластин по толщине, причем последние на порядок меньше.

Для оценки напряжений в ветвях ТЭ они были схематизированы в виде обычной анизотропной балки [2].

Значения реакций в связях при единичных относительных смещениях опор можно определить из общего решения дифференциального уравнения

$$\frac{d^4y}{dx^4} = 0 \tag{1}$$

для прогибов балки (рис. 4) при отсутствии нагрузки с учетом того, что

$$M = -EJ\frac{d^2y}{dx^2};$$
 (2)

$$Q = \frac{dM}{dx},\tag{3}$$

где Е — модуль упругости полупроводниковой ветви в направлении волокон (оси балки); *J* — момент инерции.

Решая (1) при граничных условиях

$$\begin{cases} x = 0, \ y_0 = 0, \ y' = \varphi_0 = 0; \\ x = l, \ y = \Delta, \ \varphi_l = 0 \end{cases}$$
(4)

с учетом (2) и (3), получим

$$M_0 = -\frac{6EJ}{l^2}\Delta; \qquad (5)$$

$$M_{\rm l} = \frac{6EJ}{l^2} \Delta; \qquad (6)$$

$$Q = \frac{12EJ}{I^3}\Delta.$$
 (7)

Зная момент и поперечную силу, можно вычислить напряжения, возникающие в поперечном сечении балки:

$$\sigma = \frac{M_{\rm H}}{I} y_b; \qquad (8)$$
$$\tau \approx \frac{Q}{A},$$

где о и т — соответственно нормальное и касательное напряжение ветви;  $M_{\mu} = M_l$ ,  $I = b^4/12$  — осевой момент инерции;  $A = b^2$  — площадь поперечного сечения ветви ТЭ;  $y_b$  — координата поперечного сечения ветви.

Сдвиг полупроводниковой ветви  $\Delta$  можно найти как тепловое перемещение керамической пластины. При этом центр пластины (центр ТМ) можно считать неподвижным вследствие симметрии нагрева.

Для расчета сдвига каждой ветви ТЭ можно записать:

$$\Delta_{i, j} = \alpha \Delta T r_{i, j}, \tag{9}$$

где а — тепловой коэффициент линейного расширения керамической пластины TM;  $\Delta T$  — перепад температур между холодным и горячим теплопроводами; r<sub>i, j</sub> — вектор, характеризующий положение ветви ТЭ на керамической пластине.

Для *r<sub>i. i</sub>* можно записать:

$$r_{i,j} = (\delta + b) \sqrt{i(i-1) + j(j-1) + 0, 5} , \qquad (10)$$

где  $\delta$  — расстояние между ветвями ТЭ в ТМ.

Наибольшие перемешения получают точки керамической пластины. лежащие на наибольшем удалении от ее центра (в углах пластины), т. е. на периферийной части пластины будут возникать максимальные напряжения (рис. 5), которые могут привести к разрушению ветвей.



- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 2, 2010 -

Расчет напряжений показал, что максимальные нормальные напряжения (2,6 МПа для наиболее нагруженных крайних элементов пластины при разности температур 100 К), возникающие в поперечных сечениях ветви, превышают касательные более чем в 4 раза ( $\tau_{max} = 0,54$  МПа), поэтому экспериментальные исследования параметров прочности ветвей ТЭ сводились к испытаниям ветвей только на растяжение.

Кроме того, учитывая, слоистую структуру полупроводникового материала, а также то, что длина ветви соизмерима с сечением, результаты расчета, полученные на основании классической теории балок, необходимо считать оценочными, поскольку вопрос о применимости теории расчета балок к данному полупроводниковому материалу требует дополнительного исследования.

Помимо силовых нагрузок при температурных деформациях керамических пластин, рассмотренных выше, полупроводниковые ветви во время эксплуатации ТМ подвергаются термическому воздействию.

Регистрация сигналов акустической эмиссии [3] в различных режимах работы ТМ показала, что термоупругие волны напряжений являются, по-видимому, преобладающими в момент включения ТМ и выхода его на рабочий режим, после чего происходит затухание термоупругих волн за счет диссипации энергии (явление термоупругой релаксации).

#### Подготовка образцов и проведение испытаний

Образцы, исследуемые в данной работе, представляют собой ветви ТЭ, изготовленные из заготовок, полученных модифицированным методом Бриджмена.

Модифицированный метод Бриджмена заключается в выращивании термоэлектрических пластин в плоской полости. Кристаллизация термоэлектрического материала проводится в литьевой форме. В результате использования метода выращивания в плоской полости получаются материалы со структурой, в которой плоскости спайности не только параллельны направлению роста кристалла (что характерно для зонной плавки), но и практически параллельны между собой и внешним граням слитка.

Данным методом были получены слитки двух типов:

- пластины размером 41 × 49 × 1,4 мм;
- пластины размером 41 × 49 × 0,27 мм.

Выращивание более тонких пластин должно способствовать большему структурному совершенству термоэлектрического материала.

Из полученных заготовок были изготовлены ветви трех типов.

Первый тип — стандартные ветви ТЭ, полученные из слитков в виде пластин толщиной, равной размеру сечения ветви (в нашем случае 1,4 мм), что является наиболее удобным как с точки зрения контроля характеристик, так и для последующей резки на ветви. Пластины *p*-типа дополнительно проходили высокотемпературный отжиг.

Второй тип исследованных образцов представлял собой сборные ветви, составленные из нескольких тонких (0,27 мм) пластин, соединенных с противоположных торцов пайкой. В итоге получалась ветвь, пластины в которой располагались параллельно направлению протекания тока.

Также исследовались образцы, полученные прессованием тонких (0,27 мм) пластин (прессование ветви). Прессование пластин происходило под давлением 37,5 МПа, при температуре 590 и 565 °С для *n*- и *p*-типа соответственно. Выдержка в обоих случаях составляла 30 мин. Спрессованный блок разрезался на шайбы, толщина которых выбиралась исходя из высоты требуемых ветвей ТЭ.

Завершающей операцией для всех трех видов полученных объектов была электроэрозионная резка, в результате которой вырезались ветви нужного сечения. В данной работе исследованы ветви 1,4 × 1,4 × 1,6 мм.

Растяжение проводилось вдоль длинной стороны ветви (в направлении оси роста) на испытательной машине Galdabini Quasar 50 цифровым тензометром с минимальной скоростью деформации 0,5 мкм/мин [4]. Была изготовлена медная оснастка, к которой припаивались ветви с помощью припоя Bi—Sb.

Для учета влияния деформации оснастки и припоя были построены тарировочные кривые. Как показали испытания, разрушение происходит в материале образца, а не на границе припой—образец.

Проведенные испытания показали, что ветви *р*типа следуют закону Гука до разрушения (рис. 6). Ветви *n*-типа также следуют закону Гука, но имеют



Рис. 6. Характерная диаграмма растяжения ветвей р-типа

Технология		Тип	Модуль упругости,	СКО модуля	Предел прочности,	СКО предела
		проводимости	МПа (среднее	упругости,	МПа (среднее	прочности,
		ветви	значение)	МПа	значение)	МПа
	Стандартные	p	68,9	27,7	14,0	3,76
	ветви	n	52,3	14,5	16,6	4,92
Модифициро- ванный метод Бриджмена	Сборные ветви	p n	78,4 70,2	18 9,7	15,8 19,8	3,2 1,86
	Прессованные	p	72,9	27	12,5	2,82
	ветви	n	82,8	12,1	17,8	3,97

Результаты испытаний ветвей ТЭ на растяжение



участок пластической деформации перед разрушением (рис. 7).

В таблице представлены результаты испытаний на растяжение ветвей ТЭ *р*- и *n*-типа, изготовленных тремя различными методами. Всего было испытано по 20 образцов каждого типа при температуре 25 °C.

# Обсуждение результатов

Предел прочности ветвей *p*-типа в среднем составляет 12...16 МПа, ветвей *n*-типа — 16...20 МПа, т. е. прочность ветвей *p*-типа на 15...30 % (в зависимости от технологии) меньше предела прочности ветвей *n*-типа, что объясняется влиянием отжига платин *p*-типа для получения заданных термоэлектрических свойств. При этом наблюдается большой разброс прочностных характеристик: среднее квадратическое отклонение (СКО) предела прочности составляет 1,86...5 МПа.

Сравнение механической прочности ветвей ТЭ, полученных различными методами (стандартные, сборные и прессованные ветви), показало, что сборные ветви имеют более высокие показатели при минимальном разбросе. Это может быть связано с тем, что пластины с малой толщиной имеют более совершенную структуру при тех же скоростях кристаллизации [5]. Прессование пластин, по-видимому, приводит к появлению дополнительных структурных нарушений, однако разброс прочности образцов оказался меньше, чем у стандартных ветвей.

# Заключение

Таким образом, результаты исследования показывают, что механические свойства ветвей во многом определяются их неоднородностью [6] и структурными нарушениями, связанными с условиями их получения.

Расчет надежности показал, что применение сборных ветвей ТЭ позволит на 16 % повысить надежность TM.

#### Список литературы

1. **Проников А. С.** Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 560 с.

2. **Феодосьев В. И.** Сопротивление материалов. М.: Наука, 1986. 512 с.

3. Барзов А. А. Эмиссионная технологическая диагностика. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2005. 384 с.

4. **ГОСТ 1497—84.** Металлы. Методы испытания на растяжение. М.: Изд-во стандартов, 1987. 37 с.

5. Бублик В. Т., Белов Ю. М., Воронин А. И. и др. Влияние условий кристаллизации на структуру пластин твердых растворов термоэлектрических материалов на основе Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, выращенных из расплава // Изв. вузов: Материалы электронной техники. 2008. Вып. 2.

6. Гольцман Б. М., Кудинов В. А., Смирнов И. А. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. М.: Наука, 1972. 320 с.

# УДК 53.082.743

В. В. Амеличев\*, канд. техн. наук, нач. лаб.,

И. А. Гамарц\*, мл. науч. сотр.,

С. И. Касаткин\*\*, д-р техн. наук, зав. лаб.,

- В. В. Лопатин\*, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
- А. М. Муравьев\*\*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
- Н. В. Плотникова\*\*, вед. инженер,

А. А. Резнев\*\*\*, д-р техн. наук, проф., командир войсковой части,

И. А. Решетников\*, мл. науч. сотр.,

**Ю. А. Чаплыгин**\*\*\*\*, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РАН, ректор,

\* НПК "Технологический центр" МИЭТ.

\*\* Институт проблем управления РАН,

\*\*\* Государственное учреждение войсковая часть 35533,

\*\*\*\* МИЭТ

# АНИЗОТРОПНЫЕ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУР С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КОБАЛЬТА

Представлены результаты научных исследований и разработки анизотропных магниторезистивных преобразователей магнитного поля и тока на основе тонкопленочных металлических ферромагнитных наноструктур с различным содержанием кобальта.

**Ключевые слова:** анизотропный магниторезистивный преобразователь, тонкопленочная ферромагнитная наноструктура

Тонкопленочные анизотропные магниторезистивные преобразователи (АМРП) магнитного поля и тока на рынке микроэлектронных приборов и устройств являются востребованными благодаря своим высоким техническим характеристикам и приемлемой стоимости [1]. В настоящее время основными производителями АМРП магнитного поля являются фирмы Honeywell и Philips [2—4]. Основным магниточувствительным элементом в АМРП является полоска из металлической ферромагнитной наноструктуры толщиной до 50 нм. АМРП имеют ось чувствительности, параллельную плоскости кристалла и перпендикулярную оси легкого намагничивания (ОЛН). Разработка новых типов АМРП магнитного поля и тока является одной из актуальных задач наноэлектроники в РФ.

Особого внимания заслуживает сочетание таких параметров АМРП, как высокая чувствительность, широкополосность и малые собственные шумы прибора. Это позволяет использовать их для регистрации магнитных полей на частотах до ~1 ГГц и создавать на их основе системы магнитной связи [5].

В настоящей статье представлены результаты разработки конструкции и технологии АМРП, предна-

значенного для измерения величины магнитного поля и тока. АМРП представляет собой мостовую схему, каждое плечо которой состоит из нескольких магниторезистивных (МР) полосок, соединенных последовательно низкорезистивными немагнитными перемычками, и имеет нечетную вольт-эрстедную характеристику (ВЭХ), тип и крутизна которой определяются конструкцией. Над МР полосками располагаются два планарных проводника, изолированных слоями диэлектрика. Проводник, сформированный во втором уровне металлизации, представляет собой планарную функционально-интегрированную катушку OFFSET, создающую магнитное поле, направленное параллельно оси чувствительности преобразователя. Проводник SET/RESET, выполненный в третьем уровне металлизации в виде меандра, необходим для установки начального направления векторов намагниченности МР полосок вдоль ОЛН и снижения гистерезиса ВЭХ.

В АМРП могут применяться пермаллоевые (FeNi) МР полоски, а также полоски на основе сплава FeNiCo, с 6 %- и 20 %-ным содержанием кобальта. Применение пермаллоя в АМРП позволяет достигать значений чувствительности до 3 мB/(B·Э) и порогового значения измеряемого магнитного поля на уровне 10<sup>-4</sup> Э с верхней границей диапазона измеряемого магнитного поля 1...2 Э. В настоящее время, несмотря на высокую чувствительность преобразователей на основе пермаллоя, этот материал мало применяется из-за повышенного гистерезиса, магнитных шумов и высокого температурного коэффициента сопротивления (ТКС). Использование FeNiCo-сплава увеличивает поле магнитной анизотропии, расширяет диапазон измеряемого магнитного поля, увеличивает значение МР эффекта до 2,0... 2,5 %. При этом падает чувствительность преобразователей, но уменьшаются их магнитные шумы, гистерезис и ТКС.

Проектирование АМРП проводилось в два этапа. Сначала на основе микромагнитной теории определялась зависимость направлений векторов намагниченности магнитных пленок от внешних и внутренних магнитных полей. Затем на основе результатов первого этапа и конкретной топологии АМРП определялись характеристики наноэлементов, проводились их анализ и оптимизация конструкции АМРП для достижения требуемых параметров [1].

Для упрощения вычислений и быстроты оценки результатов в качестве модели, определяющей направления векторов намагниченности ферромагнитных пленок, принималось их однородное распределение по всему объему пленки. Применение такой приближенной модели, не учитывающей поворот векторов намагниченности у краев пленки, в данном случае обеспечивало приемлемую для дальнейшего применения при проектировании точность и экономию с точки зрения временных и трудовых затрат.

В конструкции АМРП с нечетной ВЭХ МР полоски имеют наклон ±45 ° относительно ОЛН (рис. 1). Это означает, что для устранения влияния гистерезиса перед измерением магнитного поля через проводник SET/RESET необходимо пропускать импульсы тока SET/RESET, в результате чего МР



Рис. 1. Конструкция АМРП

полоски в соседних плечах мостовой схемы будут перемагничиваться в противоположные стороны. Расположение векторов намагниченности в мостовой схеме АМРП, установленное с помощью импульсов тока SET/RESET, в совокупности с расположением самих полосок относительно ОЛН создает нечетную линейную ВЭХ.

Новизна конструкции АМРП с наклонными полосками заключается в том, что проходящий над МР полосками проводник SET/RESET имеет форму компактного меандра. Структурно такой АМРП магнитного поля представляет собой подложку с диэлектрическим слоем, на котором расположены четыре ряда МР полосок с Ti(Ta)-FeNi(FeNiCo)-Ti(Ta) металлической ферромагнитной наноструктурой. Над МР полосками вдоль каждого ряда может быть сформирована планарная катушка OFFSET со вторым защитным слоем. Катушка предназначена для устранения технологического разбаланса при измерении постоянного магнитного поля путем подачи в нее постоянного тока, создающего магнитное поле вдоль направления измеряемого поля. Проводник SET/RESET располагается над верхним изолирующим слоем (рис. 1).

Работа АМРП магнитного поля происходит следующим образом. При отсутствии внешнего магнитного поля, тока в проводнике SET/RESET и сенсорного тока в мостовой схеме векторы намагниченности ферромагнитных пленок в МР полосках устанавливаются вдоль ОЛН. При подаче в проводник SET/RESET импульса тока создаваемое им магнитное поле действует вдоль ОЛН на два ряда МР полосок в одном направлении, а на два других ряда — противоположном. Под действием магнитного поля, создаваемого импульсом тока в проводнике SET/RESET, векторы намагниченности в двух парах рядов МР полосок повернутся в противоположные стороны.

При воздействии внешнего магнитного поля, направленного поперек ОЛН, все векторы намагниченности рядов МР полосок поворачиваются в его на-

правлении, причем в двух рядах МР полосок угол между вектором намагниченности и направлением протекания тока в полосках увеличивается, а в двух других — уменьшается. То есть сопротивления одной пары противоположных плеч мостовой схемы преобразователя увеличиваются, а другой — уменьшаются. Таким образом, мостовая схема разбалансируется, и на выходе АМРП магнитного поля появляется выходной сигнал, полярность которого зависит от направления измеряемого магнитного поля, при этом формируется нечетная ВЭХ преобразователя.

Для устранения влияния гистерезиса на результаты измерения магнитного поля необходимо применять тот же метод, что и для АМРП с полюсами Барбера. Данный метод заключается в том, что полный цикл измерения магнитного поля состоит из двух измерений, перед каждым изме-

рением в проводник SET/RESET подается импульс тока, перемагничивающий МР полоски, а полярности импульсов противоположны (SET и RESET). После выполнения двух измерений их результаты вычитаются и делятся пополам.

Данный АМРП может также использоваться для контроля электрического тока. При бесконтактном методе измерения электрического тока необходимо лишь снабдить преобразователь системой фиксации относительно объекта измерения для одинакового коэффициента преобразования измеренного магнитного поля в ток. Ввод преобразователя в разрыв электрической цепи может быть осуществлен при использовании планарной катушки OFFSET в качестве сигнального проводника, создающего магнитное поле, перпендикулярное ОЛН ферромагнитной пленки наноструктуры. Сигнальный



НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 2, 2010 –



проводник имеет коэффициент преобразования, достигающий значения десятков эрстед на ампер.

Экспериментальные исследования АМРП на основе FeNi показали, что чувствительность преобразователя по магнитному полю достигает 0,7 мВ/( $B \cdot Э$ ) в диапазоне  $\pm$  3 Э, однако ВЭХ имеет значительный гистерезис — до 9 % от полного диапазона выходного сигнала (рис. 2). В результате исследований преобразователей на основе FeNiCo установлено, что значение чувствительности у этих преобразователей на основе FeNiCo установлено, что сиснове FeNi, но диапазон измерения напряженности магнитного поля шире и значительно меньше гистерезис ВЭХ. Основные результаты исследований АМРП приведены в таблице, а ВЭХ АМРП на основе FeNiCo показаны на рис. 3.

Результаты экспериментальных исследований АМРП на основе FeNi, FeNiCo<sub>6</sub> и FeNiCo<sub>20</sub>

Параметр	АМРП на основе FeNi	АМРП на основе FeNiCo <sub>6</sub>	АМРП на основе FeNiCo <sub>20</sub>
Диапазон измерения напряженности маг- нитного поля, Э	±3	±7	±10
Чувствительность по магнитному полю, $MB/(B \cdot \Im)$	0,7	0,65	0,55
Чувствительность по электрическому току, $MB/(B \cdot A)$	70	65	55
Гистерезис, %	9,0	0,96	0,12

Исследование АМРП магнитного поля и электрического тока с линейной нечетной ВЭХ показывает, что предложенная новая конструкция преобразователя обладает высокими техническими характеристиками и рядом преимуществ по сравнению с имеющимися аналогичными преобразователями, а добавление кобальта в магниторезистивный сплав позволяет значительно улучшить характеристики АМРП.

Развитие конструктивно-технологического базиса АМРП магнитного поля и тока перспективно в направлении создания СВЧ приборов и устройств на их основе и новых видов микросистем.

## Список литературы

1. Касаткин С. И., Васильева Н. П., Муравьев А. М. Спинтронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе. М.: Электросервис, 2005. 160 с.

2. URL: http://www.ssec.honeywell.com/

3. URL: http://www.nxp.com/

4. Касаткин С. И., Муравьев А. М. Тонкопленочные магниторезистивные датчики // Электронные компоненты. 2003. № 3. С. 1—4.

5. Резнев А. А. Интегральные магниторезистивные микроприборы нового поколения // Петербургский журнал электроники. 2007. № 3. С. 41–53.

# УДК 681.586'33.72

Е. В. Игнатьева\*, инж., e-mail: elena.ignateva@gmail.com, Ю. А. Михайлов, канд. техн. наук, С. П. Тимошенков, д-р техн. наук, проф, МИЭТ, e-mail: spt@miee.ru \* НПК "Технологический центр" МИЭТ

# О ПРОЕКТИРОВАНИИ МЕМБРАНЫ С ЖЕСТКИМ ЦЕНТРОМ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЕВЫХ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ДАВЛЕНИЯ ОТ 0,025 ДО 25 МПа

Представлена методика проектирования мембраны с жестким центром кремниевых тензопреобразователей давления. Показано, что при заданных изменениях выходного напряжения и нелинейности менее 0,2 % диапазон давлений 0,025...25 МПа реализуем на кристалле 4 × 4 мм при использовании мембран двух размеров, имеющих прямоугольный жесткий центр.

**Ключевые слова:** кремниевый тензопреобразователь давления, кристалл ИПД, мембрана с жестким центром

Кристаллы кремниевых интегральных тензопреобразователей типа ИПД, выпускаемые НПК "Технологический центр" МИЭТ [1—3], используются в составе датчиков давления в качестве первичного преобразователя измеряемой механической величины в пропорциональный электрический сигнал выходное напряжение. Кристалл состоит из толстой несущей рамки жесткости и тонкого упругого элемента (мембраны), полученного путем локального анизотропного травления кремния с обратной стороны кристалла. На лицевой стороне кристалла в теле упругого элемента сформированы четыре ионно-

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 2, 2010 -

легированных тензорезистора *p*-типа проводимости, объединенных токоведущими дорожками в мостовую схему, а на несущей рамке размещена схема термокомпенсации чувствительности, содержащая биполярный *n-p-n* транзистор и резистивный делитель. Различные типономиналы тензопреобразователя по давлению реализуются путем изменения толщины мембраны. Остальные конструктивные параметры кристаллов конкретного типа ИПД, такие как размеры мембраны, расположение тензорезисторов, схема термокомпенсации чувствительности, сохраняются неизменными для всех типономиналов.

В публикациях, посвященных интегральным преобразователям давления [1—4], не рассматриваются детально вопросы, связанные с разработкой конструкции мембран для кремниевых кристаллов ИПД, а систематизированное их изложение в виде методики проектирования отсутствует.

Целью настоящей работы является рассмотрение совокупности вопросов инженерного проектирования мембран с жестким центром (ЖЦ) для кремниевого интегрального тензопреобразователя давления в широком диапазоне типономиналов при пониженной нелинейности преобразовательной характеристики.

# Исходные данные для проектирования

Параметры преобразовательной характеристики определяют зависимость сигнала на выходе от значения сигнала на входе преобразователя. Требования к параметрам преобразовательной характеристики проектируемого кристалла ИПД в диапазоне давлений от 0,025 до 25 МПа представлены в табл. 1.

Значения изменения выходного напряжения  $\Delta U_{\rm вых}$  при воздействии номинального давления, принятые при проектировании, заданы на уровне требований к кристаллам ИПД, выпускаемым НПК ТЦ МИЭТ (рис. 1), при этом нелинейность преобразовательной характеристики должна быть не более 0,2 %, т. е. вдвое меньше, чем у преобразователей давления серии 1191, 1192 [2], для которых  $2K_{\rm H} \leq 0,4$  %.

	Таблица 1
Требования к метрологическим характеристи	кам
проектируемого кристалла инид	

Наименование	Номер группы типономиналов давления						
параметра	1	2	3	4	5	6	
1. Верхний предел измеряемого давле- ния (номинал) $P_{\rm H}$ , МПа 2. Изменение вы- ходного напряже- ния $\Delta U_{\rm BЫX}$ , мВ, не менее 3. Нелинейность преобразователь- ной характеристи- ки $2K_{\rm H}$ , %, не более	0,025 40 0,2	0,040 0,063 50 0,2	0,10 0,16 60 0,2	0,25 0,40 0,63 70 0,2	1,0 1,6 2,5 4,0 80	6,3 10 16 25 90 0,2	
ной характеристи- ки $2K_{\rm H}$ , %, не более							



Рис. 1. Нижняя граница  $\Delta U_{\text{вых}}$  для номинальных давлений от 0,025 до 25 МПа:

1 — преобразователи давления серии 1191, 1192 [2]; 2 — технические условия на чувствительные элементы давления ГАВЛ 400 800 001 ТУ, 2008 г.; 3 — проектируемый кристалл ИПД

Использование в кристалле кремниевого тензопреобразователя давления мембраны с ЖЦ по сравнению с плоской мембраной позволяет существенно снизить нелинейность преобразовательной характеристики при некотором снижении чувствительности мембраны [3].

Зависимость нелинейности преобразовательной характеристики  $2K_{\rm H}$  от изменения выходного напряжения  $\Delta U_{\rm Bbix}$ , представленная на рис. 2, показывает, что нелинейность преобразовательной характеристики для кристалла с плоской мембраной гораздо выше, чем для кристалла с мембраной, имеющей ЖЦ, при одинаковых значениях изменения выход-



от изменения выходного напряжения:

1 -кристалл ИПД 2 (размер плоской мембраны — 2 × 2 мм; толщина — 32 мкм); 2 - кристалл ИПД 9 (размер мембраны с жестким центром — 2,2 × 2,2 мм; толщина — 28 мкм)



гис. 5. График зависимости нелиненности выходной характеристики от  $v = a_{II}/a_M$  в логарифмических координатах при давлении: 1 - 0,1 МПа; 2 - 0,06 МПа

ного напряжения и удельной чувствительности  $S_{ya} = 0.42 \text{ мB/B} \cdot \kappa \Pi a.$ 

Требование к проектируемому кристаллу ИПД по нелинейности преобразовательной характеристики  $2K_{\rm H} \leq 0.2$  % (см. табл. 1) принято, исходя из требований потребителей чувствительных элементов и тензомодулей с кристаллами ИПД. Возможность его выполнения основана на результатах работы [5] по экспериментальному исследованию влияния геометрических размеров ЖЦ на параметры преобразовательной характеристики при различных расстояниях между тензорезисторами. Полученные в работе [5] результаты представлены на рис. 3 в виде зависимости нелинейности преобразовательной характеристики от отношения расстояний между двумя парами тензорезисторов по краям мембраны и ЖЦ  $v = a_{II}/a_{M}$  при толщине мембраны 23 мкм. Из рис. 3 видно, что при увеличении v нелинейность сильно уменьшается, поэтому для обеспечения требуемой нелинейности для проектируемого кристалла было выбрано отношение  $v = \sqrt{2}/2$ .

Зависимость между удельной чувствительностью упругого элемента и его геометрическими размерами для кристалла, имеющего квадратную мембрану с квадратным ЖЦ (рис. 4), выглядит следующим образом [6]:

$$S_{\rm yg} = 0,128\pi_{44} \frac{a_{\rm M}^2}{d_{\rm M}^2} \cdot \frac{k_1^2 - 1}{k_1^2} (1 - \mu), \qquad (1)$$

где π<sub>44</sub> — главный пьезорезистивный коэффициент для тензорезисторов *p*-типа проводимости в кремнии ориентации (001); μ — коэффициент Пуассона.

В данной формуле  $k_1 = \frac{a_{\rm M}}{a_{\rm H}}$ . Выражение  $\frac{k_1^2 - 1}{k_1^2} =$ 

 $= 1 - \frac{a_{II}^2}{a_{M}^2}$  характеризует долю площади, занятой

тонкой частью мембраны с квадратным ЖЦ. С учетом этого формулу (1) можно представить в виде:

$$S_{\rm yg} = \frac{\Pi_{\rm KY}^*}{d_{\rm M}^2},$$
 (2)

где  $\Pi_{ky}^*$  — константа для конкретного кристалла ИПД, названная нами расчетным показателем чувствительности конструкции [7],

$$\Pi_{\rm KY}^* = 0,128\pi_{44} \left( a_{\rm M}^2 - a_{\rm II}^2 \right) (1-\mu). \tag{3}$$

Диапазон изменения выходного напряжения с учетом формулы (2) определяется из выражения

$$\Delta U_{\rm Bbix} = S_{\rm yg} P_{\rm H} U_{\rm M} = \frac{\Pi_{\rm KY}^*}{d_{\rm M}^2} P_{\rm H} U_{\rm M}, \tag{4}$$

где  $P_{\rm H}$  — номинальное давление, кПа;  $U_{\rm M}$  — напряжение на входе тензомостовой схемы, В.

Значение главного пьезорезистивного коэффициента  $\pi_{44}$  для диффузионного слоя кремния *p*-типа проводимости ориентации (001) определяется из зависимости  $\pi_{44}$  от температуры и поверхностной кон-



Рис. 4. Вид кристалла ИПД с мембраной, имеющей ЖЦ:

 $L_{\rm kp}$  — размер кристалла;  $a_{\rm M}$  — расстояние между парой тензорезисторов по краям мембраны;  $a_{\rm II}$  — расстояние между парой тензорезисторов по краям ЖЦ;  $d_{\rm M}$  — толщина мембраны;  $d_{\rm kp}$  — толщина кристалла;  $L_6$  — ширина буртика;  $L'_{\rm M}$  и  $L_{\rm II}$  — размер жесткого центра по верху и дну мембраны;  $L'_{\rm II}$  и  $L_{\rm M}$  — размер мембраны в плоскости кристалла и размер дна мембраны;  $a_p$  — расстояние между тензорезисторами;  $\varphi$  — угол между плоскостями (001) и (111), равный 54,7°; c — расстояние от края тензорезистора до края мембраны или ЖЦ;  $H_{\rm at}$  — глубина анизотропного травления

Таблица 2 Требования к конструктивным и электрическим параметрам проектируемого кристалла ИПД

Наиме	нование пара	аметра;	Вариант		
обозначен	ие; единицы	измерения	№ 1	Nº 2	
Габаритные кристалла	размеры	$L_{\rm kp}$ , мкм	4 × 4	3 × 3	
Номинальн	ая толщи- la	<i>d</i> <sub>кр</sub> , мкм	425	425	
Ширина бу щей рамки не менее	ртика несу- кристалла,	<i>L</i> <sub>б</sub> , мкм	600	600	
Отношение расстояний между двумя парами тензорезисторов		$v = \frac{a_{II}}{a_{M}}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	
Размеры тензоре- зистора	азмеры ширина ензоре- длина истора		20 400	15 300	
Расстояние от края тензорезистора до края мембраны или ЖЦ		С, МКМ	10	10	
Допусти- мый диапа-	минимум	$d_{_{\rm M}}^{\rm min}$ , мкм	25	25	
зон толщин максимум мембраны:		$d_{_{\rm M}}^{\rm max}$ , мкм	170	—	
Напряжение на входе тензомостовой схемы при напряжении пита-		U <sub>M</sub> , B	2,7 ± 0,2		
Поверхност тивление <i>p</i> - резисторов	тное сопро- слоя тензо-	<i>R</i> <sub>p</sub> , Ом/□	180		

центрации примеси. При температуре 20 °С и поверхностной концентрации  $5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> коэффициент  $\pi_{44} = 105 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/H =  $1,05 \cdot 10^3$  мВ/В · кПа; коэффициент Пуассона для плоскости ориентации (001) равен 0,184 [8].

Для иллюстрации предлагаемой инженерной методики проектирования мембран с жестким центром выбраны два варианта кристалла ИПД размером  $4 \times 4$  мм и  $3 \times 3$  мм с заданными требованиями к метрологическим характеристикам (см. табл. 1). Отметим, что в преобразователях давления, описанных в работе [2], кристалл ИПД 9 размером 4 × 4 мм используется для номинальных давлений 0,025...0,63 МПа. Требования к конструктивным и электрическим параметрам проектируемых кристаллов ИПД (рис. 4) представлены в табл. 2. Ширина буртика несущей рамки  $L_{\rm f}$  до резки пластины на кристаллы задана исходя из условий сборки чувствительного элемента [2]. Минимально допустимая толщина мембраны  $d_{\rm M}^{\rm min}$  выбрана исходя из того, что при толщине мембраны менее 20 мкм значительно возрастает температурный гистерезис нуля и чувствительности. Максимально допустимая толщина мембраны  $d_{\rm M}^{\rm max}$  выбрана по условиям жесткости несущей рамки кристалла.

# Определение показателя чувствительности конструкции

Проектирование кристалла кремниевого интегрального тензопреобразователя давления с мембраной, имеющей квадратный ЖЦ, при заданных требованиях (см. табл. 1 и 2), следует начать с расчета геометрических размеров мембраны. Все результаты расчетов при проектировании отражены в табл. 3.

Зная размеры стороны кристалла и ширину буртика несущей рамки (см. рис. 4), определяем максимально возможный размер мембраны  $L'_{\rm M}$ , включающий боковые склоны, образованные плоскостями (111):

$$L'_{\rm M} = L_{\rm Kp} - 2L_{\rm b}.$$
 (5)

Размер дна мембраны  $L_{\rm M}$  (см. рис. 4) получаем, вычтя из  $L'_{\rm M}$  две проекции боковых склонов:

$$L_{\rm M} = L'_{\rm M} - \sqrt{2} \left( d_{\rm Kp} - d_{\rm M}^{\rm min} \right) = L'_{\rm M} - \sqrt{2} H_{\rm ar}^{\rm max},$$
 (6)

где  $H_{\rm at}^{\rm max}$  — максимальная глубина анизотропного травления, равная разности толщин кристалла и мембраны.

Определим местоположение двух пар тензорезисторов над тонкой частью мембраны с лицевой стороны кристалла. Тензорезисторы следует располагать по краям мембраны и ЖЦ в местах наибольших механических напряжений при деформации мембраны. Расстояние тензорезистора до края мембраны или ЖЦ выбрано равным 10 мкм с учетом разброса положения края мембраны ±15 мкм от расчетного значения при глубоком анизотропном травлении. Тем самым минимизируется влияние этого фактора, при котором тензорезисторы могут оказаться над боковым склоном, что значительно ухудшает чувствительность кристалла. Таким образом, расстояние между парой тензорезисторов по краям мембраны  $a_{\rm M}$  (включая их ширину) рассчитывается по формуле

$$a_{\rm M} = L_{\rm M} - 2c. \tag{7}$$

Далее рассчитаем расстояние между парой тензорезисторов по краям ЖЦ  $a_{II}$  (исключая их ширину), учитывая заданное отношение расстояний между двумя парами тензорезисторов по краям мембраны и ЖЦ:

$$a_{\rm II} = \frac{\sqrt{2}}{2} a_{\rm M},\tag{8}$$

Закончим данный этап проектирования вычислением расчетного показателя чувствительности кон-

струкции  $\Pi_{K^{\rm H}}^*$  по формуле (3) для двух вариантов кристаллов ИПД, что позволяет далее определить толщины мембран исходя из формулы (4) для нормированного ряда номинальных давлений в заданном диапазоне 0,025...25 МПа.

Таблица 3

#### Результаты расчета при проектировании мембраны

Наименование параметра; расчетная формула;					квадрат. ЖЦ	Кристалл с пр	ямоуг. ЖЦ
обозначение; единицы измерения				$4 \times 4$ MM	3 × 3 mm	4 × 4 mm	3 × 3 mm
1. Размер мембраны по дну: $L_{\rm M} = L_{\rm KD} - 2L_{\rm KD}$	$L_6 - \sqrt{2} H_{\rm ar}^{\rm ma}$	x	$L_{\rm m}$ , мкм	2230	1230	2230	1230
2. Расстояние между парой тензорезисторо. (включая их ширину): $a_{\rm M} = L_{\rm M} - 2c$	в по краям м	иембраны	<i>а</i> <sub>м</sub> , мкм	2210	1210	2210	1210
3. Расстояние между парой тензорезисторов п	ю краям ЖЦ	$a_{\rm H} = \sqrt{2} / 2a_{\rm M}$	<i>а</i> <sub>ц</sub> , мкм	1562	856	1562	856
4. Длина ЖЦ в плоскости мембраны: $a'_{II} =$	$L'_{\rm u0} + 1.33$	$3H_{ar}^*$	$a'_{\mathrm{II}},$	_	_	886	676
5. Показатель чувствительности конструкци $\Pi_{ky}^* = 0.128\pi_{44}(a_M^2 - a_{\mu}^2)(1 - \mu);$	ии: для квад	р. ЖЦ:	мкм П <sub>кч</sub>	268	80	384	97
для прям. ЖЦ: $\Pi_{K^{4}}^{*} = 0,128\pi_{44}(a_{M}^{2} - a_{II}a_{II}')$	(1 – μ)						
		0,025		<25	<25	24	<25
		0,040 0,063		<25 29	<25 <25	27 34	<25 <25
	<i>Р</i> <sub>н</sub> , МПа	0,10 0,16	<i>d</i> <sup>в</sup> <sub>м</sub> , мкм	33 42	<25 <25	39 50	<25 25
6. Верхняя граница допуска по толщине мембраны для каждого $P_{\rm H}$ :		0,25 0,40 0,63		48 61 76	26 33 42	58 73 87	29 37 46
$d_{\rm M}^{\rm B} = \sqrt{\frac{0.93 \Pi_{\rm KH}^{\rm *} P_{\rm H} 10^3  U_{\rm M}}{\Delta  U_{\rm BMX}}}$		1,0 1,6 2,5 4,0		90 114 142 >170	49 62 78 98	108 136 170 >170	54 68 86 108
		6,3 10 16 25		>170 >170 >170 >170 >170	116 147 185 232	>170 >170 >170 >170 >170	128 161 204 255
7. Максимально возможная длина компенс	атора углово	ого растрава:	$L_{r}^{\max}$ ,				
ЖЦ квадратной формы $L_{\kappa}^{\max} = (A + L_{\mu 0})$ -	$-180 = a_{\rm M} -$	$-a_{\rm p} - 180;$	MKM	1706	855	—	—
прямоугольной формы $L_{\kappa}^{\max} = 0,5(L_{\rm M0} - L_{\rm H0}') + L_{\rm H0} - 180$				—	—	—	935
8. Минимальная возможная толщина мемб шения угловой компенсации $d_{\rm M}^{ m yk} = d_{ m kp} - d_{ m kp}$	браны по усл L <sub>к</sub> <sup>max</sup> /2 √2	ювиям разме-	d <sub>м</sub> <sup>ук</sup> , мкм	$< d_{\rm M}^{\rm min}$	127	$< d_{\rm M}^{\rm min}$	94

# Расчет толщины мембраны и компенсатора углового растрава ЖЦ

Для расчета толщины мембраны используем выражение

$$d_{\rm M}^{\rm B} = \sqrt{\frac{0.93\Pi_{\rm KY}^* P_{\rm H} 10^3 U_{\rm M}}{\Delta U_{\rm BbIX}}}.$$
 (9)

Полученная формула позволяет рассчитать верхнюю границу допуска по толщине мембраны  $d_{\rm M}^{\rm B}$  при номинальном давлении  $P_{\rm H}$  для пессимистического варианта, когда фактическое значение показателя чувствительности конструкции  $\Pi_{\rm KY}$  будет составлять

0,93 от расчетного  $\Pi_{K^{\rm V}}^*$ , а напряжение мостовой схемы будет равным 2,6 В. При таком подходе, учитывающем разброс  $\Pi_{K^{\rm V}}$  и  $U_{\rm M}$  [7] относительно проектных значений, большинство кристаллов (не менее

90 %) будет удовлетворять требованию по  $\Delta U_{\rm BMX}$  (см. табл. 1).

При проектировании ЖЦ на кремниевой мембране необходимо учитывать, что при глубоком анизотропном травлении происходит подтрав вершин ЖЦ, детально исследованный в работе [9]. Для сохранения формы ЖЦ используются компенсаторы (рис. 5) в виде полоски одинаковой или различной Т-образной формы [9; 10].

После анизотропного вытравливания мембраны на ее поверхности остаются локальные утолщения от стравленных компенсаторов (рис. 6, см. четвертую сторону обложки). Чтобы они не попадали в области расположения тензорезисторов, компенсаторы углового растрава на фотошаблоне должны примыкать к сторонам ЖЦ, перпендикулярным тензорезисторам.

Рассчитаем максимально возможную длину углового компенсатора квадратного ЖЦ  $L_{\rm K}^{\rm max}$ . На рис. 5, *а* 



Рис. 5. Эскиз топологии фотошаблона под мембрану с квадратным жестким центром и компенсацией углов: *а* — одинаковой Т-образной формы; *б* — различной Т-образной формы

видно, что длина  $L_{\rm K}^{\rm max}$  ограничивается размерами полосок  $c_1'$  и  $c_2'$ :

$$L_{\rm K}^{\rm max} = c_1' + c_2' + c_0.$$

Ширина полоски компенсатора  $c_0$  выбирается равной 40 мкм с учетом бокового подтрава под маску; рекомендуемая в работе [9] ширина в 80...100 мкм сильно завышена. Минимальное расстояние между маскированными элементами эскиза топологии мембраны выбрано равным 20 мкм. Из рис. 5 имеем:

$$c'_{1} = A - 2 \cdot 40 - 2 \cdot 20 = A - 120;$$
  
 $c'_{2} + c_{0} = L_{\mu 0} - 40 - 20 = L_{\mu 0} - 60;$ 

 $L_{\rm K}^{\rm max} = (A - 120) + (L_{\rm II0} - 60) = (A + L_{\rm II0}) - 180.(10)$ 

С учетом бокового подтрава сторон мембраны и ЖЦ в используемом для ИПД процессе анизотропного травления определяем размеры на фотошаблоне:

$$A = a_{\rm p} + 2c + 1,33 H_{\rm ar}^{\rm max};$$

$$L_{\rm II0} = a_{\rm II} - 2c - 1,33 H_{\rm ar}^{\rm max}.$$
(11)

Следовательно, сумма размеров  $A + L_{II0} = a_p + a_{II} = a_M - a_p$  является константой для конкретной конструкции мембраны с квадратным ЖЦ.

Требуемая длина компенсатора углового растрава ЖЦ Т-образной формы (см. рис. 5) для конкретного типономинала давления вычисляется по формуле

$$L_{\rm yK} = \sqrt{2} \, k_{\rm yFJ} H_{\rm aT},\tag{12}$$

где  $k_{\rm yrn} = \frac{V_{\rm yrn}}{V_{001}}$  — коэффициент углового растрава, оп-

ределяемый экспериментально;  $V_{\rm угл}$  — скорость травления прямоугольной вершины маскированной фигуры;  $V_{001}$  — скорость травления в направлении [001]. По данным работы [9] в ходе анизотропного травления в 33 %-ном водном растворе КОН при температуре 90 °С значение  $k_{\rm угл}$  составило 1,6. В используемом для ИПД технологическом процессе анизотропного травления  $k_{\rm угл} = 1,8...2,1$ . При проектировании было принято значение  $k_{\rm угл} = 2,0$ . При неверном задании длины компенсатора углового растрава жесткий центр приобретает форму, ухудшающую чувствительность, особенно для малогабаритной мембраны (рис. 7, см. четвертую сторону обложки).

## При рассмотрении результатов расчета верхней

границы допуска по толщине мембраны  $d_{\rm M}^{\rm B}$  для проектируемого кристалла 4 × 4 мм получается, что кристалл может быть реализован на давления от 0,063 до 2,5 МПа. Давления 0,025, 0,04 и диапазон 4...25 МПа не может быть получен ввиду ограничений по толщине мембраны. Расчеты для проектируемого кристалла 3 × 3 мм показали, что ограниче-

ние по  $L_{\rm K}^{\rm max}$  позволяет реализовать кристалл только

в диапазоне давлений 10...25 МПа. Таким образом, на проектируемых кристаллах  $4 \times 4$  и  $3 \times 3$  мм с мембраной, имеющей квадратный ЖЦ, нет возможности получить номинальные давления 0,025, 0,04, 4 и 6,3 МПа.

Для решения данной проблемы обратимся к формуле (1), из которой видно, что увеличение доли площади, занимаемой тонкой частью мембраны, приводит к росту удельной чувствительности  $S_{va}$  и

 $\Pi_{kq}^*$ . Долю тонкой части мембраны можно увеличить без ущерба для нелинейности выходной характеристики путем уменьшения размера ЖЦ по направлению, параллельному тензорезисторам, при этом сторона ЖЦ по дну мембраны должна быть не меньше, чем длина тензорезисторов, иначе распределение механических напряжений в области тензорезисторов будет неоднородным [11].

Эффект увеличения  $\Pi_{kv}$  при таком укорачивании ЖЦ подтвержден экспериментально на одном из типов ИПД. С учетом перечисленных выше условий спроектируем мембрану с прямоугольным ЖЦ для кристаллов 4 × 4 и 3 × 3 мм.

# Проектирование мембраны с прямоугольным ЖЦ

Зададим на фотошаблоне длину стороны темного окна под ЖЦ, параллельной тензорезисторам, равной  $L'_{\mu 0} = l_p - 50$ . Данный размер обеспечивает получение стороны ЖЦ по дну мембраны не менее длины тензорезистора *l*<sub>p</sub>. Геометрические размеры мембраны, а также размер стороны ЖЦ в направлении, перпендикулярном тензорезисторам, остаются неизменными. Для мембраны с прямоугольным ЖЦ в формуле расчета (3) показателя чувствительности конструкции  $\Pi_{\rm \scriptscriptstyle KY}^*$  площадь ЖЦ определяется как произведение его длины  $a_{\rm II}$  на ширину  $a'_{\rm II} = L'_{\rm II0} + 1,33 H^*_{\rm at}$ , при этом для кристалла 4 × 4 мм  $H_{\rm arr}^* = d_{\rm пл} - d_{\rm м}^{\rm min}$ , а для кристалла 3 × 3 мм  $H_{aT}^* = d_{\Pi\Pi} - 1,1 d_M^K$ , где  $d_M^K$  толщина мембраны для  $P_{\rm H} = 4$  МПа при квадратном ЖЦ; 1,1 — коэффициент, приближенно учитывающий влияние на  $d_{\rm M}$  ожидаемого увеличения  $\Pi_{\rm KY}^*$ . Результаты расчета (табл. 3, п. 5) показывают, что значения П<sup>\*</sup><sub>ки</sub> для мембраны с прямоугольным ЖЦ имеют большие значения, чем для мембраны с квадратным ЖЦ для обоих вариантов кристаллов. Верхняя граница допуска по толщине мембраны смещается вверх для каждого типономинала давления (табл. 3, п. 6), что способствует снижению нелинейности преобразовательной характеристики. В результате увеличения  $\Pi_{kq}^*$  на кристалле 4 × 4 мм становится возможным реализация типономиналов 0,025 и 0,04 МПа. Отметим, что при замене квадратного ЖЦ на прямоугольный уменьшается его масса и соответственно увеличивается резонансная часто-

та мембраны [12]. В случае мембраны с прямоугольным ЖЦ выражение для максимально возможной длины углового компенсатора  $L_{\rm K}^{\rm max} = c_1' + c_2' + c_0$  для кристалла 3 × 3 мм примет вид:

(13)

 $L_{\nu}^{\text{max}} = 0.5(L_{\rm M0} - L_{\rm m0}') + L_{\rm m0} - 180,$ 

где

$$L_{\rm M0} = a_{\rm M} + 2c + 1,33 H_{\rm arr}^{*};$$
  
 $L_{\rm II0} = a_{\rm II} - 2c - 1,33 H_{\rm arr}^{*}.$ 

Увеличение  $L_{\rm K}^{\rm max}$  позволяет реализовать на кристалле 3 × 3 мм номинальные давления 4 и 6,3 МПа и тем самым заполнить весь ряд заданных типономиналов. Для кристалла 4 × 4 мм значение  $L_{\rm K}^{\rm max}$  не критично.

Для изложенных выше условий проектирования кристалл  $3 \times 3$  мм с ЖЦ может быть реализован лишь для номинальных давлений 4 МПа и более ввиду ограничения по возможности защиты вершин ЖЦ от углового растрава. В то же время, если исходить из ограничения по нижней границе толщины мембраны 25 мкм, данный кристалл пригоден для меньших давлений вплоть до 0,16 МПа.

Чтобы расширить область применения кристалла  $3 \times 3$  мм с ЖЦ на давления 0,16...2,5 МПа, необходимо разработать новую, более эффективную конструкцию компенсатора углового растрава вершин ЖЦ. Иначе по условиям сборки чувствительных элементов использование кристалла  $3 \times 3$  мм нерационально. В существующей ситуации целесообразно для давлений 4...25 МПа увеличить размер кристалла с  $3 \times 3$  мм до  $4 \times 4$  мм без изменения конструкции мембраны. В этом случае повышается жесткость кристалла для этих давлений и обеспечивается унификация комплектующих и технологии сборки чувствительных элементов для всех кристаллов заданного диапазона номинальных давлений 0,025...25 МПа.

## Выводы

1. Приведена совокупность метрологических, конструктивных, электрических и технологических исходных данных, необходимых для проектирования мембраны интегральных тензопреобразователей давления в диапазоне 0,025...25 МПа.

2. Выявлено, что мембрана с квадратным ЖЦ не позволяет реализовать все заданные типономиналы

давления вследствие недостаточной чувствительности конструкции в области низких давлений и ввиду невозможности обеспечить защиту вершин ЖЦ от углового растрава в случае малогабаритной мембраны, необходимой в области высоких давлений.

3. Показано, что замена квадратного ЖЦ на прямоугольный путем уменьшения длины стороны ЖЦ, параллельной тензорезисторам, приводит к увеличению доли площади, занимаемой тонкой частью мембраны, и позволяет реализовать все заданные типономиналы давления, благодаря тому, что возрастает чувствительность конструкции и снижается ограничение по защите вершин ЖЦ от углового растрава.

4. Для унификации комплектующих и технологии сборки чувствительных элементов все 16 заданных типономиналов давления от 0,025 до 25 МПа целесообразно реализовывать на кристалле 4 × 4 мм с использованием двух вариантов спроектированных конструкций мембраны с прямоугольным ЖЦ.

# Список литературы

1. Зимин В. Н., Данилова Н. Л., Панков В. В., Шабратов Д. В. Базовые конструкции интегральных тензопреобразователей на ряд давлений от 0,01 до 40 МПа // Датчики и системы. 1999. № 2. С. 52—55.

2. Шелепин Н. А., Данилова Н. Л., Панков В. В., Суханов В. С. Преобразователи давления — микросхемы серии 1191, 1192 // Датчики и системы. 2007. № 1. С. 28–33.

3. Шелепин Н. А., Амеличев В. В., Данилова Н. Л., Павлов А. Ю., Панков В. В. Разработка серии интегральных преобразователей давления // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2007. № 1. С. 79—81. 4. Золотов Ю. Н., Тимошенков С. П., Шелепин Н. А. Применение комплексных методов проектирования в процессе разработки интегральных преобразователей механических величин // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 4—10.

5. Бобровник В. Н., Данилова Н. Л., Павлов А. Ю., Панков В. В., Шелепин Н. А. Исследование влияния геометрических параметров кристалла интегрального преобразователя давления (ИПД) на выходные характеристики // Тезисы докладов XVI научно-технической конференции "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления". М.: МГИЭМ, 2004. С. 68–69.

6. Датчики теплофизических и механических параметров. Справочник в 3-х томах. Т. 1. Кн. 1 / Под общей ред. Ю. Н. Коптева. — М.: ИПРЖР, 1998. 456 с.

7. Игнатьева Е. В., Михайлов Ю. А. О показателе чувствительности конструкции кремниевых тензопреобразователей давления // Датчики и системы. 2008. № 10. С. 35—38.

8. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.

9. Ушков А. В., Исакова Г. А., Рябов В. Т. Разработка методики компенсации выпуклых углов при формировании мембраны чувствительного элемента давления с жестким центром в водном растворе КОН // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 6. С. 55—58.

10. Соколов Л. В., Школьников В. М. Способ защиты углов трехмерных микромеханических структур на кремниевой пластине при глубоком анизотропном травлении. — Патент РФ № 2220475—2003.

11. Ушков А. В. Разработка конструктивно-технологических методов производства кремниевых чувствительных элементов давления с повышенной стойкостью к перегрузкам: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 16 с.

12. Гридчин В. А., Драгунов В. П. Физика микросистем. Ч. 1. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 416 с. (с. 377—384).

# УДК 531.787.084.2:629.735

Е. А. Мокров, д-р техн. наук, генеральный директор, Е. М. Белозубов, канд. техн. наук, нач. группы, Н. Е. Белозубова, инженер, e-mail: niifi@sura.ru, Пенза, ОАО "НИИ физических измерений"

# ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ЕМКОСТНЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ДЕФОРМИРУЕМЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

Рассмотрены тонкопленочные емкостные микроэлектромеханические системы с деформируемым диэлектриком с планарными и цилиндрическими электродами. Определены оптимальные соотношения их основных элементов.

**Ключевые слова:** тонкопленочные емкостные микроэлектромеханические системы, деформируемый диэлектрик

Недостатками тонкопленочных емкостных микроэлектромеханических систем (ТЕМЭМС) с тонкопленочным диэлектриком являются сравнительно невысокий ресурс работы при воздействии повышенных температур и низкая электрическая прочность. Эти недостатки вызваны несовершенством структур тонкопленочных диэлектриков и их малой толщиной. Недостатком ТЕМЭМС с тонкопленочным диэлектриком является также сравнительно высокая трудоемкость их изготовления, объясняемая необходимостью использования прецизионной механической и электрохимикомеханической обработки поверхности упругого элемента (УЭ) для ее качественного сопряжения с тонкопленочной диэлектрической пленкой.

Кроме того, сравнительно небольшая чувствительность TEMЭMC с тонкопленочным диэлектриком обусловлена тем, что контактные площадки, расположенные в одной плоскости с электродами, требуют уменьшения площади электродов, что приводит к уменьшению чувствительности. Это связано с тем, что контактные площадки в TEMЭMC с тонкопленочным диэлектриком расположены на радиусе, большем радиуса электродов, и несмотря на сравнительно небольшую площадь самих контактных площадок при неизменных поперечных размерах TEMЭMC необходимо снижение площади электродов для обеспечения расположения контактных площадок. От этих недостатков свободны ТЕМЭМС с монолитным деформируемым диэлектриком. Увеличение ресурса работы при воздействии повышенных температур, а также электрической прочности ТЕМЭМС с деформируемым диэлектриком достигается, в частности, за счет возможности увеличения толщины диэлектрика до 20 мкм и более, в то время как толщина тонкопленочного диэлектрика по определению не может превышать 5 мкм. Кроме того, более плотная структура монолитного деформируемого диэлектрика также улучшает температурные характеристики предлагаемых ТЕМЭМС [1]. В соответствии с предложенной классификацией [1] среди ТЕМЭМС с монолитным деформируемым диэлектриком, в частности, можно выделить ТЕМЭМС:

- с планарными электродами;
- с цилиндрическими электродами;
- с двумя подвижными и двумя неподвижными цилиндрическими электродами;
- с двумя подвижными и тремя неподвижными цилиндрическими электродами;
- с двумя подвижными и тремя неподвижными цилиндрическими электродами одинаковой ширины.

# ТЕМЭМС с планарными электродами

ТЕМЭМС (рис. 1, см. третью сторону обложки) содержит корпус 1, УЭ 2 в виде мембраны 3 с жестким центром 4 и с установленной на поверхности УЭ, противолежащей его планарной стороне, диэлектрической подложкой 5. На подложке 5 сформированы электроды 6, соединенные с контактными площадками 7, контактирующими с выводными проводниками 8. На УЭ закреплена (например, с помощью лазерной сварки) с межэлектродным зазором пластина 9 с установленной на ее торце второй диэлектрической подложкой 10. На подложке 10 сформированы ответные электроды 11, соединенные с контактными площадками 12, которые контактируют с выводными проводниками 8.

Диэлектрические подложки УЭ и пластины выполнены в виде гибких фольгированных диэлектрических пленок, жестко закрепленных нефольгированными сторонами на УЭ и пластине. Контактные площадки электродов размещены на подложках, закрепленных на торце пластины, противолежащем торцу с электродами, и на боковой поверхности выступа 13, выполненного в центральной части пластины. Контактные площадки разделены равномерно размещенными радиальными токопроводящими перегородками 14, выполненными как одно целое с пластиной и выступом. Выводные проводники изготовлены в виде проводов АВКТ-4, экраны 15 которых электрически и механически соединены с выступом и корпусом [2]. Припой 16, упругая прокладка 17, элемент уплотнения 18 обеспечивают необходимую герметизацию внутренней полости ТЕМЭМС. Деформируемые диэлектрические подложки в этом и последующих решениях выполнены из полиимилной пленки толщиной 20 мкм, фольгированной никелевой фольгой толщиной 3 мкм.

Применение деформируемых диэлектриков снижает трудоемкость изготовления TEMЭMC, так как избавляет от необходимости использования прецизионной механической и электрохимикомеханической обработки поверхности УЭ, что позволяет использовать эти TEMЭMC в тех изделиях, где ценовой фактор является определяющим. Примененное расположение контактных площадок повышает технологичность за счет улучшения контактирования проводников с контактными площадками, уменьшает поперечные размеры и увеличивает чувствительность за счет возможности увеличения площади электродов при одних и тех же поперечных размерах TEMЭMC.

Контактные площадки разделены равномерно размещенными радиальными токопроводящими перегородками, что повышает чувствительность вследствие увеличения помехоустойчивости за счет экранирования от взаимного влияния выводных проводников. Механическое закрепление экранов проводников повышает технологичность вследствие уменьшения требований к прочности соединения диэлектрической подложки с пластиной и прочности соединения выводных проводников с контактными площадками. Дальнейшим развитием этого решения является изготовление пластины из диэлектрического материала, в качестве которого может быть использован связующий материал [3].

# ТЕМЭМС с деформируемым диэлектриком и цилиндрическими электродами

Недостатком ТЕМЭМС с планарными электродами является наличие нелинейной зависимости емкости от измеряемого давления. Нелинейность вызвана обратно пропорциональной зависимостью емкости от зазора между электродами. Кроме того, недостатком ТЕМЭМС с планарными электродами является сравнительно небольшие значения емкостей электродов, связанные с тем, что их площадь ограничена площадью мембраны.

От этих недостатков свободны TEMЭMC с непланарными, например цилиндрическими, электродами, которые можно выполнить на деформируемом диэлектрике. Выполнение электродов в виде цилиндрических колец позволяет уменьшить габаритные размеры и повысить технологичность, так как цилиндрическая поверхность обеспечивает сочетание максимальной площади электродов при заданных поперечных линейных размерах с простотой и совершенством обработки.

На рис. 2 (см. третью сторону обложки) изображены предлагаемая ТЕМЭМС и развертка электродов. Она содержит корпус I, мембрану 2 с цилиндрическим периферийным основанием 3, диск 4, закрепленный на мембране, и преобразователь деформаций в виде двух пар противолежащих электродов, два из которых выполнены в виде жестко соединенной с диском по его периферии цилиндрической металлической втулки 8, расположенной концентрично периферийному основанию. Электрическая изоляция металлической втулки выполнена за счет изготовления диска из керамики ВК-94-1. Электроды 6 и 7 расположены на внешней стороне диэлектрической втулки 5, жестко закрепленной на опорном основании концентрично металлической втулке. Выводы 9 и 10 электродов соединены с гермовыводами 11 [4].

Под воздействием измеряемого давления металлическая втулка  $\delta$  перемещается относительно электродов 6 и 7. При этом емкость конденсатора, образованного металлической втулкой и электродом 7, уменышится, а емкость конденсатора, образованного металлической втулкой и электродом 6, увеличится. Так как емкость пропорциональна площади, то соответственно емкости конденсаторов будут линейно зависеть от измеряемого давления.

Преимуществом предлагаемого решения является также повышение чувствительности вследствие увеличения емкости за счет увеличения площади электродов из-за их непланарного размещения. Кроме того, предлагаемое решение позволяет существенно увеличить изменение емкостей электродов, а следовательно, чувствительность [4].

# ТЕМЭМС с деформируемым диэлектриком, двумя подвижными и двумя неподвижными цилиндрическими электродами

ТЕМЭМС (рис. 3) содержит корпус 1, мембрану 2 с жестким центром 3 и опорным основанием 4 и преобразователь деформаций в виде двух пар противолежащих электродов 5, 6 и 7, 8, две диэлектрические втулки 9 и 12, металлическую втулку 10 и шток 11. Два электрода 5 и 7 из разных пар выполнены в виде цилиндрических колец на внешней стороне втулки 9, закрепленной на опорном основании 4, а два других электрода 6 и 8 выполнены в виде цилиндрических колец на внешней стороне втулки 12, закрепленной на металлической втулке 10, соединенной штоком 11 с жестким центром 3 мембраны 2 [5].

В устройстве формирования выходного сигнала ТЕМЭМС, содержащем задающий генератор 15, усилитель 17, к входу, в цепь обратной связи которого подключены электроды, последовательно с усилителем 17 введен дополнительный усилитель 16.

В цепь обратной связи усилителя 16 включена вторая пара электродов 3 [5].

Предлагаемое пространственное расположение электродов позволяет повысить чувствительность, так как дополнительно используется изменение емкости конденсатора  $C_{5-6}$ , образованного электродами 5 и 6, в результате чего выходной сигнал при одном и том же приращении измеряемого давления изменяется на большую величину. Для определения оптимальных соотношений размеров электродов обратимся к рис. 3, *в*. В начальном состоянии, когда измеряемое давление равно нулю, емкости конденсаторов равны [6]

$$C_{5-6} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_{OH_3}}{\ln\frac{R_1}{R_2}}; C_{5-8} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_O0}{\ln\frac{R_1}{R_2}} \approx 0;$$
$$C_{7-8} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_OH_2}{\ln\frac{R_1}{R_2}}, \qquad (1)$$

где є,  $\varepsilon_{\rm O}$  — относительная и абсолютная диэлектрические проницаемости;  $R_1$ ,  $R_2$  — радиусы электродов.

Подставляя значения емкостей в выражение для выходного сигнала, получим, что выходной сигнал в этом случае равен нулю. При воздействии максимального измеряемого давления

$$C_{5-6} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_{O}0}{\ln\frac{R_{1}}{R_{2}}} \approx 0; \ C_{5-8} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_{O}(H_{1}-S)}{\ln\frac{R_{1}}{R_{2}}}; C_{7-8} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_{O}(H_{4}-H_{1})}{\ln\frac{R_{1}}{R_{2}}}.$$
(2)

Непосредственно из рис. 3, *a*, *b* следует, что  $H_3 = M$ , где M — максимальное перемещение подвижных электродов относительно неподвижных при



**Рис. 3. ТЕМЭМС с деформируемым диэлектриком, двумя подвижными и неподвижными цилиндрическими электродами:** *a* — развертка неподвижных и подвижных электродов; *б* — структурная электрическая и эквивалентная схемы предлагаемого устройства формирования выходного сигнала; *в* — расчетная модель определения соотношения размеров электродов

воздействии измеряемого давления. Если  $H_3$  будет больше M, то не полностью будут использованы возможности измерения емкости конденсатора  $C_{5-6}$ вследствие неполной ее модуляции измеряемым давлением. Если же  $H_3$  будет меньше M, то при определенном значении измеряемого давления происходит потеря монотонности изменения выходного сигнала от измеряемого давления, связанное с тем, что при определенном измеряемом давлении напротив электрода 5 будет только свободный промежуток между электродами 6 и 8, что и приведет к отсутствию модуляции изменения емкости  $C_{5-6}$  от измеряемого давления [5].

В случае, если  $H_1$  будет больше суммы  $H_3 + S$ , где S — расстояние между электродами (подвижными и неподвижными), то неоправданно уменьшится модуляция емкости С5-6 измеряемым давлением, так как изменение будет начинаться не с нулевого, а с какого-то большего значения, что приведет или к увеличению размеров, или уменьшению чувствительности. Если же величина  $H_1$  будет меньше суммы  $H_3$  + S, то появится немонотонность модуляции емкости С<sub>5-8</sub> вследствие того, что до определенного значения измеряемого давления значение емкости C<sub>5-8</sub> не будет зависеть от измеряемого давления. Учитывая, что  $H_3 = M$ , можно записать  $H_1 = M + S$ . Для обеспечения максимальной чувствительности необходимо, в частности, чтобы было максимальное изменение знаменателя в выражении выходного сигнала, т. е.  $C_5 - C_6$  и  $C_7 - C_8$ . Приравнивая значения емкостей  $C_{5-6}$  и  $C_{7-8}$  и проведя необходимые преобразования, получим  $H_2 = H_3 = M$  [5].

Из анализа рис. 3, *а*, *в* видно, что в силу соображений, высказанных по поводу величины  $H_1$ , следует, что  $H_2 = M$ ,  $H_4 = M + S$ . Расстояние *S* между электродами, расположенными на одной цилиндрической втулке, выбрано одинаковым для обеих втулок в связи с тем, что оно определяется технологическими возможностями и не зависит от местоположения электродов на той или иной втулке. Для обеспечения минимальных габаритных размеров необходимо, чтобы длина металлической втулки была  $L_{\rm B} = H_1 + S + H_2$  (см. рис. 3, *a*, *в*). Подставляя  $H_1 = M + S$ ,  $H_2 = M$ , получим  $L_{\rm B} = 2(M + S)$ . Если  $L_{\rm B}$  будет больше 2(M + S), то неоправданно увеличатся габаритные размеры, а если меньше, то невозможно будет размещение электродов на втулке. Таким образом, оптимальные соотношения размеров для элементов ТЕМЭМС имеют вид [5]

$$H_1 = M + S; H_2 = M; H_3 = M; H_4 = M + S; L_B = (M + S),$$
(3)

где  $H_1$ ,  $H_2$  — ширина электродов, расположенных на первой диэлектрической втулке;  $H_3$ ,  $H_4$  — ширина электродов, расположенных на второй диэлектрической втулке; M — максимальное перемещение штока под действием измеряемого давления; S — расстояние между электродами, расположенными на одной цилиндрической втулке;  $L_{\rm B}$  —длина металлической втулки.

При измеряемом давлении, равном нулю, емкость конденсаторов, образованных электродами 5 и 6, 7 и 8, максимальна, а емкость конденсатора, образованного электродами 5 и 8, минимальна. Под воздействием измеряемого давления вторая диэлектрическая втулка с электродами 6 и 8 сместится относительно первой диэлектрической втулки с электродами 5 и 7. Вследствие этого емкость конденсаторов, образованных электродами 5 и 6, 7 и 8, уменьшается, а емкость конденсатора, образованного электродами 5 и 8, увеличивается. При воздействии максимального измеряемого давления емкость конденсаторов, образованного электродами 5 и 6, 7 и 8, будет минимальна, а емкость конденсатора, образованного электродами 5 и 8, будет максимальна. Таким образом, измеряя емкости конденсаторов, образованных электродами 5 и 6, 7 и 8, 5 и 8, можно однозначно судить об измеряемом давлении.

Задающий генератор 15 (рис. 3,  $\delta$ ) формирует синусоидальное напряжение, которое через конденсатор постоянной емкости поступает на дополнительный усилитель 16, на выходе которого появляется сигнал амплитудой

$$U_{\rm BX} \frac{C_0}{C_{7-8}}$$
. (4)

Сигнал с усилителя 16 подается через конденсатор, образованный электродами 5 и 8, на усилитель 17, на выходе которого образуется сигнал амплитудой

$$U_{\rm BMX} = U_{\rm BX} \frac{C_0 C_{5-8}}{C_{7-8} C_{5-6}}.$$
 (5)

При измеряемом давлении, равном нулю, емкость конденсаторов  $C_{5-6}$ ,  $C_{7-8}$  максимальная, а емкость  $C_{5-8}$  минимальная, выходной сигнал с усилителя 17 будет минимальным (в соответствии с выражением (5)). При воздействии максимального измеряемого давления емкость конденсатора  $C_{5-8}$ достигает максимального значения, емкости конденсаторов  $C_{5-6}$  и  $C_{7-8}$  — минимального, а выходной сигнал устройства формирования достигает максимума.

Уменьшение габаритных размеров и повышение чувствительности в предлагаемом решении происходит за счет использования модуляции от измеряемого давления дополнительного конденсатора, характер изменения емкости которого от измеряемого давления совпадает с изменением емкости у одного из имеющихся конденсаторов. Уменьшение габаритных размеров и повышение чувствительности достигается также за счет формирования выходного сигнала в виде частного, в числителе которого — значение емкости, увеличивающейся с воздействием давления, а в знаменателе — произведение емкостей, убывающих с увеличением давления.

# ТЕМЭМС с деформируемым диэлектриком, двумя подвижными и тремя неподвижными цилиндрическими электродами

Предлагаемая ТЕМЭМС (рис. 4) содержит корпус I, мембрану 2 с опорным основанием 3, диск 4, преобразователь деформаций в виде двух пар противолежащих электродов 5, 6 и 7, 8 (два электрода 5 и 7из разных пар) и дополнительно введенный электрод 9 в виде цилиндрических колец, расположенных на внешней стороне первой цилиндрической диэлектрической втулки 10, жестко закрепленной на опорном основании, концентрично металлической втулке 11 [7].

В результате обоснований, аналогичных приведенным выше, в соответствии с рис. 4, *a*, *в* получены оптимальные соотношения размеров для элементов ТЕМЭМС:

$$H_1 = M + S; H_2 = M; H_3 = M + S;$$
  
 $H_4 = M + S; H_5 = M,$  (6)

где  $H_1$ ,  $H_2$  — ширина электродов, расположенных на первой диэлектрической втулке;  $H_3$ ,  $H_4$  — ширина электродов, расположенных на второй диэлектрической втулке;  $H_5$  — ширина дополнительного электрода; M — максимальное перемещение металлической втулки под действием измеряемого давления; S — расстояние между электродами, расположенными на одной цилиндрической втулке.

Предлагаемое решение позволяет повысить чувствительность, так как по сравнению с предыдущим решением дополнительно используется изменение емкости конденсаторов  $C_{5-6}$  и  $C_{6-9}$ , в результате чего выходной сигнал при одном и том же приращении измеряемого давления изменяется на большую величину.

# ТЕМЭМС с деформируемым диэлектриком, двумя подвижными и тремя неподвижными цилиндрическими электродами одинаковой ширины

Особенностью ТЕМЭМС (рис. 5) является наличие двух подвижных и трех неподвижных цилиндрических электродов одинаковой ширины. При этом два электрода 5 и 7 из разных пар выполнены в виде цилиндрических колец, расположенных на внешней стороне первой диэлектрической втулки 9, жестко закрепленной на цилиндрической металлической втулке 10, выполненной как одно целое с диском. Три других электрода 6, 8, 11 выполнены в виде цилиндрических колец, размещенных на внешней стороне второй диэлектрической втулки 12, жестко соединенной с периферийным основанием. Середины электродов 5 и 7 расположены против середин промежутков между электродами 6, 8, 11 [8].

ТЕМЭМС работает аналогично описанной выше с отличиями, обусловленными наличием дополнительных электродов и тем, что одинаковые изменения емкостей от воздействия температуры приводят к взаимной компенсации температурных изменений емкостей в мостовой схеме. Для определения оптимальных размеров электродов обратимся к рис. 5, a, d. Непосредственно из рис. 5, a следует, что при воздействии максимального давления верхний край электрода 5 должен быть ниже верхнего края электрода b на величину S. Если край электрода 5 будет ниже электрода b на большую величину, то модуляция изменения емкостей электродов от измеряемого давления будет неполная, что уменьшит чувствительность.

Если же край электрода 5 будет ниже электрода 6 на меньшую величину, то изменение емкостей конденсаторов  $C_{5-6}$  и  $C_{7-11}$  будет носить немонотонный характер, так как перемещение электродов 5 и 7 не будет сопровождаться уменьшением емкости этих конденсаторов в связи с тем, что нижние области электродов 5 и 7 будут перемещаться против



**Рис. 4. ТЕМЭМС с деформируемым диэлектриком, двумя подвижными и тремя неподвижными цилиндрическими электродами:** *a* — развертка неподвижных и подвижных цилиндрических электродов; *б* — структурная электрическая и эквивалентная схемы устройства формирования выходного сигнала; *в* — расчетная модель определения соотношения размеров электродов



Рис. 5. ТЕМЭМС с деформируемым диэлектриком, двумя подвижными и тремя неподвижными цилиндрическими электродами одинаковой ширины:

*а* — развертка подвижных и неподвижных цилиндрических электродов; *б* — расчетная модель определения размеров электродов и принципиальная электрическая схема TEMЭMC

промежутков между электродами 6, 8 и 8, 11. Тогда непосредственно из рис. 5, *а* следует, что M = 0.5H + 0.5S - S, или после преобразования

$$H = 2M - S, \tag{7}$$

где *H* — ширина каждого из электродов; *M* — максимальное перемещение металлической втулки под действием измеряемого давления; *S* — промежуток между электродами, расположенными на одной диэлектрической втулке.

Измерение фактической емкости и натяжения диэлектрической основы до достижения расчетных емкостей позволяет обеспечить минимально необходимую воздушную прослойку между гибкой диэлектрической основой и ее подложкой. Минимальная воздушная прослойка позволяет обеспечить максимальное значение емкости электродов, а следовательно, и максимальную чувствительность ТЕМЭМС.

#### Список литературы

 Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А. Тонкопленочные микромеханические системы и датчики на их основе // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 2. С. 33-39.
 Белозубов Е. М., Мокров Е. А. Патент РФ № 2010199.

2. Белозубов Е. М., Мокров Е. А. Патент РФ № 2010199. Емкостный датчик давления и способ его изготовления. Опубл. 30.03.94. Бюл. № 6.

 Белозубов Е. М. Емкостный датчик давления. Патент РФ № 2044289. Опубл. 20.08.95. Бюл. № 24.
 Белозубов Е. М., Мокров Е. А. Патент РФ № 1769025.

4. Белозубов Е. М., Мокров Е. А. Патент РФ № 1769025. Емкостный датчик давления и способ его изготовления. Опубл. 15.10.92. Бюл. № 38.

5. Мокров Е. А., Белозубов Е. М. Патент РФ № 1789897. Емкостный датчик давления, способ его изготовления и устройство формирования его выходного сигнала. Опубл. 23.01.93. Бюл. № 3.

6. **Кузьмичев В. Е.** Законы и формулы физики. Киев: Наукова думка. 1989. 259 с.

7. Мокров Е. А, Белозубов Е. М. Патент РФ № 1791737. Емкостный датчик давления и устройство формирования его выходного сигнала. Опубл. 30.01.93. Бюл. № 4.

8. Мокров Е. А., Белозубов Е. М. А. С. № 1820250. Емкостный датчик давления и способ его изготовления. Опубл. 07.06.93. Бюл. № 21.

# УДК 621.382

**Н. А. Зайцев**, д-р техн. наук, ОАО "НИИМЭ и МИКРОН", г. Москва, e-mail: tsvetova@micron.ru, **И. В. Матюшкин**, канд. физ.-мат. наук, МГИЭТ, e-mail: mivmiv@yandex.ru

# ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗАТВОРНОЙ СИСТЕМЫ НАНОПРИБОРОВ

Определены свойства, которыми должна обладать подзатворная система в наноприборах. Показано, что деформация  $[SiO_4]^{4-}$ -тетраэдров приводит к образованию диполей на границе  $Si-SiO_2$ . Данный эффект необходимо учитывать при определении электрических свойств нанотранзисторов. **Ключевые слова:** диоксид кремния, подзатворный диэлектрик, переходный слой, диэлектрическая проницаемость, МОП-нанотранзистор

Разработчики интегральных МОП-схем еще в начале 60-х годов XX века установили, что надежность и выход годных в значительной степени зависят от значения и стабильности заряда в МДП-системе. С тех пор и до настоящего времени ведущие фирмыразработчики и производители микросхем проводят исследования свойств этой системы — изучают структурно-примесные, физико-химические и электрофизические ее свойства. Цель этих исследований получение предельных технико-экономических характеристик приборов по степени интеграции, быстродействию, надежности при одновременном резком сокращении потребляемой мощности.

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 2, 2010 -

Толщина подзатворного диэлектрика (~1,5...3 нм) в полевых транзисторах вплотную приблизилась к туннельной и более того, становится ясно, что применение туннельных слоев SiO<sub>2</sub> в качестве подзатворного диэлектрика не только вполне возможно, но и позволяет улучшить основные параметры приборов [1]. При этом в электрическом поле в диэлектрике (~10<sup>6</sup> В/см) преобладающим механизмом переноса электронов является прямое туннелирование. В этом случае протекание тока не сопровождается появлением в разрешенной зоне диэлектрика инжектированных носителей заряда. Увеличение тока утечки приводит к проблемам, связанным с потребляемой мощностью МДП-приборов. По оценкам [2] для КМОП, выполненных по традиционной технологии фирмы Intel, эти проблемы начинают проявляться с минимальных топологических размеров 30 нм. Так при минимальном размере 10 нм рассеиваемая мошность транзистора, работающего на частоте 10 ГГц, составляет 500 Вт. В настоящее время многие ведущие фирмы пытаются решить эту задачу с использованием диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью (high-k). Создание подзатворной системы с использованием high-k диэлектриков и металла оказалась для фирмы Intel сложнейшей задачей, которую, однако, она успешно решила [3]. Данная подзатворная система должна одновременно удовлетворять следующим основным требованиям: минимальность затворных токов утечки; заданное воспроизводимое и стабильное значение фиксированного заряда; минимальность и воспроизводимость плотности ловушечных уровней с различной глубиной залегания в запрещенной зоне и числа поверхностных состояний; высокая стабильность; однородность и воспроизводимость электрофизических свойств данной структуры. При толщинах диоксида кремния менее 2 нм резко возрастают туннельные токи. Использование high-k диэлектриков приводит к снижению токов утечки, однако подзатворная система, которая используется в приборах, должна иметь весь комплекс перечисленных выше параметров. В случае термически окисленного слоя кремния граница раздела Si—SiO<sub>2</sub> формируется в глубине кремниевой пластины, поэтому традиционная подзатворная система имеет необходимый набор свойств, кроме токов утечки, для создания нанотранзисторов.

Кратко рассмотрим начальную стадию окисления кремния, детальные исследования которой приведены в работе [4]. При взаимодействии кислорода с кремнием происходит преимущественное образование их химической связи. Вероятность разрыва связи Si—O низка, так как она в два раза выше, чем химическая связь Si—Si (4,6 и 2,3 эВ соответственно). Диэлектрическая проницаемость є зависит от межатомных расстояний:

$$\varepsilon = 1 + 1,26 d_{\text{Si}-\text{O}}^2 (1 + F_i), \qquad (1)$$

где  $d_{Si-O}$  — расстояние между ионом кремния и кислорода (Å);  $F_i$  — степень ионности химической связи Si-O.

Обычно принимают, что химическая связь Si-O на 41 % состоит из ионной и 59 % ковалентной составляющих. В этом случае происходит деформация тетраэдра  $[SiO_4]^{4-}$ , так как энергия связи О—О практически на порядок ниже энергии связи Si-O, а ковалентный радиус кремния выше, чем радиус кислорода, то можно предположить о некотором смещении ионов кислорода относительно иона кремния. С квантовомеханической точки зрения деформация тетраэдров выражается в изменении длины химических связей, что приводит к некоторой разориентации d-орбиталей кремния и р-орбиталей кислорода. Такие изменения должны приводить к изменению значения диэлектрической проницаемости. О наличии диполей на границе Si—SiO<sub>2</sub> и их влияние на электрофизические свойства обсуждалось в ранних работах, в том числе и в нашей работе [5]. Эксперимент показывает [6], что прилегающие к кремнию слои диоксида кремния имеют существенное различие в значениях статической (ε,) и оптической (ε<sub>0</sub>) диэлектрических проницаемостей (см. рисунок). Это различие обусловлено деформацией тетраэдра  $[SiO_4]^{4-}$  и, как следствие, его поляризацией.

Дипольные кластеры [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> связываются друг с другом с образованием на поверхности полимерных цепочек. Согласно эпитаксиальной теории Брюка-Энгеля, анионный комплекс [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> примет ту ориентацию, при которой энергия связи Si-O будет максимальна. Таким образом, кристаллическое поле подложки способствует образованию лишь одной из возможных модификаций с точки зрения близости структурных параметров. Первый моноатомный слой структурной модификации кварца образуется в плоскости кремниевой пластины. Соединение тетраэдров  $[SiO_4]^{4-}$  происходит по мости-ковому кислороду. Соединения гранями невозможно в силу большой электростатической силы отталкивания, обусловленной взаимодействием ионов кремния. Деформированные тетраэдры (ε ≈ 2..3) находятся в переходном слое, с удалением слоя SiO<sub>2</sub> от границы Si-SiO<sub>2</sub> значение механических напряжений на этой границе падает с одновременным ростом є до 3,8. Переходный слой Si-SiO<sub>2</sub> состоит из набора деформированных и недеформированных тет-



раэдров. Поэтому мы и имеем разброс по значению фиксированного заряда и плотности ловушечных уровней. С помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии в переходной области (0,3 нм) определено состояние кремния  $Si^{+3}: Si^{+2}: Si^{+1} =$ = 5 : 3 : 1. Диэлектрические постоянные изменялись постепенно вдоль этих субоксидных слоев. Область изменения диэлектрической проницаемости от 3,8 до ~2 [6]. На начальной стадии окисления существует поток электронов в диэлектрик, возникающий в результате уравновешивания электрохимического потенциала в фазах кремния и диоксида кремния. В этом случае ловушкой для электронов могут быть структурные образования с избыточным положительным зарядом, а также отмеченные выше поляризационные комплексы на границах раздела Si-SiO<sub>2</sub>. При создании нанотранзисторов, когда толщина подзатворной системы составляет ~2 нм структурное изменение переходной области приводит к изменению ее электрофизических свойств и, как следствие, изменению электрических параметров нанотранзисторов.

Рассмотрим основные причины, приводящие к прямому туннелированию электронов из инверсионного слоя в диэлектрик. С помощью электронно-парамагнитного резонанса [4, 6] получено прямое экспериментальное подтверждение взаимодействия парамагнитных центров в диэлектрике с электронами, находящимися в инверсионном слое МДП-транзистора. В работе [6] отмечается, что наличие Е-центров в диэлектрике сопровождается большими токами утечки в нем, особенно это актуально для толщин SiO<sub>2</sub> менее 10 нм. Любая диэлектрическая пленка имеет некоторый разброс локальной толщины d, характеризуемой стандартным отклонением  $\sigma_d$ ; в случае SiO<sub>2</sub> он обычно составляет 0,1...0,3 нм [7]. В работе [7] показано, что вследствие сильной зависимости вероятности туннелирования от d ток будет резко увеличиваться с ростом  $\sigma_d$ при фиксированном среднем значении d<sub>n</sub>. Поэтому ток через подзатворный диэлектрик может быть существенно уменьшен путем повышения однородности диэлектрика [2]. Однородность диэлектрика по толщине и электрофизическим свойствам (диэлектрическая проницаемость, напряжение пробоя) напрямую связаны с чистотой атмосферы, в которой проводится формирование диэлектрика, а также с однородным потенциальным профилем поверхности кремния, с шероховатостью и загрязнением.

Отметим также, что плотность носителей заряда [11] в области инверсии  $Q_n$  связана с общей емкостью подзатворной системы  $C_{ox}$ , потенциалом в рассматриваемой точке V(y) и напряжением на затворе  $V_g$  (с поправкой на потенциал плоских зон  $V_{FB}$  и уровень Ферми в кремнии  $\varphi_F$ ) и фактором вырождения электронов g на уровне Ферми:

$$Q_n(y) = C_{ox} \Big( V_g - V_{FB} - 2\varphi_F - V(y) \Big) + \sqrt{2\varepsilon_{\text{Si}}gN_\alpha(2\varphi_F + V(y) - V_g)} .$$
(2)

Плотность инверсионного слоя также зависит от концентрации основной легирующей примеси  $N_{\alpha}$  и, следовательно, можно предположить, что вероятность инжекции электронов зависит от уровня легирования подложки. Заметим также, что некоторое

влияние оказывает и пространственная зависимость диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{Si}(y)$ .

При увеличении  $N_{\alpha}$  на 10 % вероятность инжекции электронов из инверсионного слоя в диэлектрик увеличивается с  $10^{-8}$  до  $6,3 \cdot 10^{-8}$  [4]. Значение барьера на границе Si—SiO<sub>2</sub> равна

$$\Phi_b = \Phi_{b0} - \beta E_{ox}^{1/2}.$$
 (3)

где  $E_{ox}$  — напряженность электрического поля в субоксидном слое. Для электронов  $\Phi_{b0} = 3,2$  эВ,  $\beta = 2,6 \cdot 10^{-4} e (B \cdot cm)^{-1/2} (e - заряд электрона). Вероятность преодоления барьера Si—SiO<sub>2</sub> определяется несколькими факторами. Электрон, двигаясь под действием поля$ *E*в подложке, должен набрать энергию, необходимую для преодоления барьера.

Вероятность этого события

$$P_1 = \exp(-\Phi_{bs}/E\lambda),$$

где λ — длина свободного пробега электрона. Эффективная высота барьера

$$\Phi_{bs} = \Phi_{b0} - \alpha E_{ox}^{2/3} - \beta E_{ox}^{1/2}$$

где экспериментально определяется значение  $\alpha = 4 \cdot 10^{-5} e (B \cdot cm)^{1/2}$ ,  $\Phi_{b0}$  — энергия, при которой электрон не испытывает соударений. Пренебрегая эффектами короткого канала, энергию, которую приобретает электрон в канале МДП-транзистора, можно найти из следующей формулы:

$$\Phi_{b0} = \frac{\mu_n}{2} \cdot \frac{W}{L} C_{ox} (V_g - V_t)^2,$$

где W/L — отношение ширины транзистора к длине канала;  $V_t$  — пороговое напряжение;  $\mu_n$  — подвижность электрона в канале.

Даже электрон, набравший необходимую энергию, должен изменить направление движения в канале, перпендикулярное границе Si—SiO<sub>2</sub>. При условии абсолютно упругого взаимодействия носителей заряда в канале транзистора потери энергии инжектированного в диэлектрик заряда не будет. Численные расчеты показали, что инжектированный заряд располагается в оксиде неравномерно по объему. Это является причиной изменения подвижности носителей в канале транзистора.

Если носитель заряда превысит энергетический барьер на границе Si—SiO<sub>2</sub> при условии упругого соударения зарядов  $E > \Phi_b$ , то носитель заряда попадает в подзатворную систему. В диэлектрике внутреннее поле за счет диполей будет оказывать влияние на прямое туннелирование. Поляризационные заряды создают внутри диэлектрика дополнительное поле, напряженность которого  $E_p$  противоположна по направлению основному полю и равна  $E_p = \chi_e E$ , где диэлектрическая восприимчивость  $\chi_e$  в первом приближении определяется формулой Дебая—Ланжевена:

$$\chi_e = \frac{n_0 p_e^2}{3\varepsilon_0 kT}.$$

Здесь *p<sub>e</sub>* — индуцированный дипольный момент одной молекулы; *n*<sub>0</sub> — число молекул в единице объема.

В поляризованном диэлектрике на каждую молекулу действует эффективное электрическое поле с напряженностью  $E_{\rm eff}$ :

$$E_{eff} = E + \frac{1}{3\varepsilon_0} P_e.$$

Доминирующими для формирования инжекционно-эмиссионных токов являются активационный механизм Пула-Френкеля и туннельный механизм Фаулера-Нордгейма, причем соотношение между ними определяется как свойствами диэлектрика (глубина залегания и концентрация электрически активных дефектов), так и напряженностью приложенного электрического поля. При электрическом поле, меньшем чем  $2 \cdot 10^7$  В/м, главными механизмами формирования эмиссионных токов являются туннелирование по ловушкам и термоактивация Пула-Френкеля. В электрическом поле напряженностью ~6 · 10<sup>7</sup> В/м осуществляется туннелирование по механизму Фаулера-Нордгейма [8]. Как мы отмечали выше, в процессе окисления кремния поверхностный слой диэлектрика, в котором находится большая плотность ловушек, заполнен электронами. В этом случае концентрация инжектированных электронов *n* будет равна [9]

$$n = \sqrt{\frac{N_e N_t}{2}} \exp\left(\frac{E_{t0}}{2kT}\right),$$

где  $N_e$  — концентрация разрешенных энергетических уровней в зоне проводимости;  $N_t$  и  $E_{t0}$  — концентрация и глубина залегания ловушек при E = 0.

Основное требование для формирования подзатворной системы — создание между инверсионным слоем канала транзистора и его затвором технологического слоя с большой плотностью ловушек, который препятствовал бы выходу из канала носителей заряда. Данный вывод подтверждается результатами работы [10], в которой азотирование переходного Si—SiO<sub>2</sub> снижает туннельный ток как в режиме туннелирования Фаулера—Нордгейма, так и в режиме прямого туннелирования.

#### Список литературы

1. **Грехов И. В., Шулекин А. Ф., Векслер М. И.** Деградация туннельных МОП-структур при высокой плотности тока // Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32, № 6. С. 743-747.

2. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 1. С. 2—5.

3. http://zens.sai.msu.ru//2007. C. 1-4.

4. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Система кремний—диоксид кремния субмикронных СБИС. М.: Техносфера, 2003. 383 с.

5. Зайцев Н. А. Модель структурной и электрофизической неоднородности термически окисленных слоев кремния // Изв. АН. СССР. Неорганические материалы. 1984. Т. 20, № 12. С. 2066—2069.

6. Nakamura J., Wakui S., Natori A. Dielectric Properties of the Interface between Si and SiO<sub>2</sub> // The Japan society of Applied Physics. 2007. Vol. 46. N 56. P. 3261-3264.

7. **Красников Г. Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: Техносфера, 2002. 407 с.

8. Никифоров Д. К., Коржавый А. П., Никифоров К. Г. Влияние диэлектрического нанослоя на эмиссионные свойства структур Al—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Be—BeO // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. Физика. 2009. № 11 (7а). С. 153—159.

9. **Ламперт М., Марк П.** Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973. 435 с.

10. Niimi H., Yang H., Lucovsky G., Keister J. W., Rowe J. E. Barrier layer model determined by XPS data for tunneling current reductions at monolayer nitrided Si–SiO<sub>2</sub> interfaces // Apple Surface SOI. 2000. 166. N 1–4. C. 485–491.

# УДК 537.533.2

И. В. Ехменина, инженер,

Е. П. Шешин, д-р физ.-мат. наук, проф., Н. Н. Чадаев, канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр., e-mail: chadaev@mail.mipt.ru, Московский физико-технический институт (государственный университет)

# ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ

Рассматриваются проблемы создания источников ультрафиолетового излучения на основе наноструктурированных автоэмиссионных катодов. С учетом последних достижений в области оптоэлектроники были предложены новые методы получения ультрафиолета: на основе ультрафиолетовых люминофоров и на основе фотонных кристаллов. **Ключевые слова:** ультрафиолетовое излучение, люминофор, автоэлектронная эмиссия, автокатод, спектральные характеристики, фотонный кристалл

#### Введение

В настоящее время существует много чрезвычайно важных для лазерной техники, медицины, экологии и нефтехимии фотохимических технологий и схем, для которых необходимы недорогие, эффективные и компактные источники ультрафиолетового излучения. Широко используемые в настоящее время источники ультрафиолета (эксимерные и ртутные лампы [1—3]) имеют ряд существенных недостатков. Так, ртутные лампы для получения света используют газовый разряд в парах ртути. В такой лампе эффективно возбуждается излучение вблизи 254 и 185 нм в соотношении примерно 10:1.

Основной недостаток *ртутных ламп* — низкая цветопередача (в спектре излучения преобладают холодные тона), а также наличие экологически вредного вещества — ртути. Выделяют такие характеристики ртутных ламп, как пульсация светового потока, критичность к колебаниям напряжения в сети, длительный процесс зажигания и невозможность быстрого перезапуска (перезажигание может длиться до 5 мин).

Эксимерные лампы используют эксимеры (двухатомные возбужденные молекулы) и способны излучать высокую мощность ультрафиолетового диапазона (длина волны ~354...126 нм). К существенным недостаткам таких ламп относятся: высокая стоимость, необходимость системы охлаждения, низкая интенсивность вследствие использования слаботочного барьерного разряда (мощность излучения эксимерных ламп по всей длине спектра составляет лишь пятую часть мощности излучения лампы с ртутными парами).

Поэтому необходимой является разработка новых методов получения ультрафиолета на основе последних достижений в области оптоэлектроники в целях создания эффективного и экологически безопасного источника с большой площадью излучательной поверхности. Таким рядом преимуществ обладают катодолюминесцентные источники излучения.

В последние годы идут интенсивные исследования в области создания плоских катодолюминесцентных источников излучения [4, 5], однако серийное производство пока еще не ведется. К наиболее привлекательным свойствам рассматриваемых источников света следует отнести их высокую экологичность, широкий диапазон рабочих температур, высокую устойчивость к механическим вибрациям и колебаниям напряжения в сети, низкую инерционность (время "электрического" включения катода не превышает  $10^{-8}$  с), широчайший диапазон цветности и высокую долговечность. Благодаря применению автокатода источник света не имеет греющихся частей.

Развитие материалов для автоэмиссионных источников излучения идет по двум основным направлениям — поиск новых эмиссионных материалов и разработка новых люминофоров с лучшей светимостью и долговечностью.

# Автоэлектронные катоды

Для создания автоэлектронных катодов используются различные материалы. Это, в первую очередь, тугоплавкие металлы: вольфрам, молибден, платина, рений. Также были проведены исследования автоэмиссионных свойств металлов переходных групп, таких как хром, ниобий, гафний. Множество публикаций посвящено автоэмиссии и автокатодам из полупроводниковых материалов.

Изучение автоэлектронной эмиссии углеродных материалов началось в 70-х годах и сразу же показало принципиальную перспективность таких материалов. За прошедшие годы проведены экспериментальные исследования автоэлектронной эмиссии углеродных материалов [6].

Характерными особенностями автокатодов из углеродных материалов являются: высокая плотность эмиссионного тока, высокая крутизна вольт-амперной характеристики, возможность долговременно работать в условиях технического вакуума (~10<sup>-6</sup> Topp). Автокатоды из углеродных материалов значительно дешевле и устойчивее металлических и полупроводниковых катодов, требующих для стабильной работы более высокого вакуума.

В настоящее время широкое распространение в качестве автоэмиссионного катода для катодолюминесцентных источников света получили углеродные нанотрубки.

В своих работах Filip V., Nicolaescu D., Tanemura M., Okuyama F. [7] представили рабочий прототип светоэлемента с автокатодом на основе нанотрубок. Максимальная заявленная яркость светоэлемента составила 10<sup>4</sup> кд/м<sup>2</sup>. При этом долговременная наработка источника на срок службы автокатода составила 2500 ч без существенного уменьшения автоэмиссионного тока и яркости.

Исследовательская группа Saito Y., Наtа К., Такакига А., Yotani J., Uemura S. [8] разработала ультраяркий (до  $10^6$  кд/м<sup>2</sup>) катодолюминесцентный источник света. Основу автокатода такого источника составляют многостенные нанотрубки.

Большинство работ Образцова А. Н. [9—11] посвящено изучению автоэлектронной эмиссии из алмазных и графитоподобных материалов, углеродных нанотрубок. Под его руководством разработан прототип катодолюминесцентной лампы с протяженным автокатодом в виде металлической нити, покрытой нанотрубками. Яркость такого светоэлемента достигала уровня 10<sup>5</sup> кд/м<sup>2</sup> при потребляемой мощности 3 Вт.

Существующие в настоящее время варианты конструкций источников излучения на основе автокатодов можно разделить на два основных класса: на просвет и на отражение. Основная классическая конструкция состоит из автоэлектронного катода стержневого типа и металлической диафрагмы с отверстием, которая используется для вытягивания электронов (модулятор).

Для большей равномерности свечения можно использовать автокатод с распределенными эмиссионными центрами, например пленочный. В этом случае в качестве модулятора более предпочтительно использовать хорошо натянутую сетку с большой прозрачностью, выполненную из тугоплавкого материала, как это сделано в работе [12]. Однако в таких источниках света яркость электронов используется не в полной мере (~30 %) вследствие того, что часть фотонов летит назад в колбу.

Наилучшие результаты по увеличению КПД можно получить, если сделать источник света на отражение [13]. В этом случае электроны летят к люминесцентному слою, который нанесен на алюминие вое зеркало. Потери света в данном случае определяются только незначительным (единицы процентов) поглощением света в выходном стекле и прозрачностью катодной матрицы, которую можно уменьшить до уровня менее 10 %. Довольно перспективным решением является использование в качестве автоэмиссионного катода пучка углеродных волокон [14].

Первые эксперименты по автоэлектронной эмиссии углеродных волокон проводились на образцах из вискозных волокон [15], позднее были изучены эмиссионные свойства стеклоуглеродных волокон [16].



Рис. 1. Торцевая поверхность полиакрилонитрильного углеродного волокна (a) и автокатод из пучка волокон ( $\delta$ )

Однако наиболее распространенным объектом исследования являются полиакрилонитрильные волокна (рис. 1) [17—19].

Автоэмиссионный катод на основе полиакрилонитрильного волокна наиболее стабилен в условиях технического вакуума (~10<sup>-6</sup> Торр). Эмиссионными центрами у такого автокатода являются многочисленные микровыступы, которые образованы выходящими на поверхность волокна фибриллами и их совокупностями. Во время работы автоэмиссионного катода под действием ионной бомбардировки, пондеромоторных нагрузок, разогрева микровыступов эмиссионным током, адсорбционно-миграционных процессов происходит разрушение эмиссионных центров, однако вследствие особой структуры волокна на месте разрушившихся эмиссионных центров образуются новые, поэтому эмиссионный ток существенно не изменяется. Этот факт определяет длительное время жизни автоэлектронных катодов в условиях технического вакуума (7,5 тыс. часов при токе 50 мкА [20]), а также высокую стабильность эмиссионного тока. К этому следует добавить, что углеродные волокна в огромных количествах выпускаются промышленностью ряда стран, что определяет их относительно невысокую стоимость. Наконец, они выпускаются только в виде пучков из сотен и тысяч единичных волокон диаметром 7-10 мкм каждое, что также рассматривается как положительное обстоятельство, поскольку позволяет без дополнительных операций создавать "многоэмиттерные" автоэмиссионные катоды.

# Ультрафиолетовые люминофоры

Помимо исследования новых эмиссионных материалов важным этапом разработки автоэмиссионного источника ультрафиолетового излучения является поиск новых люминофоров с высокой эффективностью и долговечностью.

С начала 90-х годов начались интенсивные исследования явлений катодолюминесценции в средневольтовом диапазоне энергий электронного пучка [21]. Как уже говорилось выше, особенно перспективным является использование в качестве возбудителей катодолюминесценции острийных катодов с диаметром острия в несколько нанометров. Но поскольку в автоэмиссионных источниках излучения электронный пучок не сканирует экран, к используемым в них люминофорным материалам предъявляются различные дополнительные, ранее не рассматривавшиеся требования, такие как:

- потенциал зажигания катодолюминесценции более 50 эВ;
- управляемость вольт-яркостной характеристики катодолюминесценции;
- высокие энергетическая и световая эффективности;
- высокая дисперсность зерен определенной формы, позволяющих наносить плотное покрытие катодолюминесцентного материала с минимальной шероховатостью;
- полная химическая и радиационная устойчивость люминофора в условиях интенсивной электронной бомбардировки;
- низкая адсорбционная способность люминофорного покрытия к остаточным газам в атмосфере прибора, исключающая заряд поверхности;
- вторичная эмиссия или весьма значительная возбужденная катодопроводимость.

Таким образом, для создания эффективного катодолюминофора необходима разработка теоретической модели взаимодействия электронного пучка с материалом люминофора. В работе Попова Ю. М. [22] выбор эффективного катодолюминофора основан на количественном соотношении между шириной запрещенной зоны материала ( $E_g$ ) и энергией, затрачиваемой на возбуждение в нем пары электрон дырка ( $E_{ep}$ ), а именно:  $E_{ep} = 3E_g$ . По этому критерию был оценен предельный энергетический выход катодолюминофора  $h = h_n/3E_g$ , где  $h_n$  — энергия кванта излучения. При этом порог зажигания люминофора предполагался равным  $E_{пор} = 3E_g + E_0$  ( $E_0 \sim 30$  эВ). Таким образом  $E_{пор} = 50$  эВ.

Однако данный критерий, хотя и давал хорошие результаты при расчете предельного значения эффективности катодолюминофоров, но для описания характеристик многих известных люминофоров не подходил. Так, ширина запрещенной зоны оксида цинка равна 3,6...3,8 эВ, а порог возбуждения этого люминофора составляет 3 эВ. Также предложенный критерий не предусматривал кристаллографическую анизотропию катодолюминесценции, присущую некоторым монокристаллам (например, рубину).

Для описания процессов переноса энергии первичного электронного возбуждения в кристаллофосфоре была использована плазмонная модель Д. Пайнса [23]. Согласно этой модели, частота объемных плазмонных образований (плазмонов)  $w_{\rm Pn}$ связана с концентрацией N, зарядом электрона и его массой следующей зависимостью:  $w_{\rm Pn} = (Ne^2/m)^{1/2}$ .

Модель Пайнса подтвердили многочисленные исследования спектров характеристических потерь электронов металлических и диэлектрических пленок, на которых экспериментально были обнаружены линии, близкие к значениям энергии плазмона. Однако некоторые широкозонные люминофоры не соответствуют объемно-плазмонной модели [24—26]. Это объясняется тем, что в твердом теле коллективные образования формируются не только по объемному или поверхностному механизмам, но и в линейных химических связях, образованных частично локализованными электронами [25]. В этом случае применяются линейно-плазмонные и плазмоннокластерные модели, которые эффективны не только при анализе известных люминофоров, но и при оптимизации параметров малоизученных соединений. Исследования эффективностей люминофоров на основе плазмонной модели представлены в статье Н. Сощина и В. Большухина [27].

К наиболее известным ультрафиолетовым люминофорам относятся  $BaSi_2O_5$ : Pb (355 нм), SrFB<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Eu(II) (366 нм), SrB<sub>4</sub>O<sub>7</sub>: Eu (368 нм), однако все эти люминофоры возбуждаются средним ультрафиолетовым излучением на длине волны 254 нм. Такие люминофоры применяются в газоразрядных лампах УФО, которые пригодны для возбуждения сульфидных люминофоров, нанесенных на шкалы приборов, а также для люминесцентного анализа.

В последнее время ведутся многочисленные исследования катодолюминесцентных материалов с различными диапазонами излучения, в том числе и излучающие в ультрафиолетовой области спектра.

Так, в работе [28] были исследованы спектры стационарной катодолюминесценции нелегированных кристаллов BaF<sub>2</sub> при энергии электронного пучка 5 кэВ и различных температурах (80 K, 220 K, 300 K). В спектрах катодолюминесценции (рис. 2) наряду



Рис. 2. Нормированные спектры стационарной катодолюминесценции ( $j = 1 \text{ мкA/см}^2$ , U = 5 кB) нелегированных кристаллов ВаF<sub>2</sub> при разных температурах:

1—80 К; 2—220 К; 3—300 К



Рис. 3. Температурная зависимость интенсивности полосы катодолюминесценции 4,15 эВ (1) и 5,7 эВ (2)



Рис. 4. Спектры катодолюминесценции монокристалла MgO, измеренный при 90 К при возбуждении электронами 25 кэВ (кривая *1*) и монокристаллических эпитаксиальных слоев MgO повышенной частоты (кривая *2*)

с известными полосами излучения при 4,15 и 5,7 эВ наблюдались две дополнительные полосы в вакуумной ультрафиолетовой области с максимумами при 6,4 и 7 эВ. Интенсивность катодолюминесценции коротковолновых полос возрастала с повышением температуры, при этом соотношение интенсивностей полос при 5,7 и 6,4 эВ оставалось практически постоянным, а интенсивность полосы при 7,0 эВ росла несколько сильнее по отношению к ним (рис. 3).

Похожие исследования были проведены в работе [29]. Изучалась катодолюминесценция монокристалла MgO при возбуждении электронами с энергией от 2 до 25 кэВ при плотностях тока 10...300 мк $A \cdot cm^{-2}$ . На спектрах катодолюминесценции наблюдался эмиссионный пик на длине волны 162 нм, излучение на этой длине волны наблюдалось на всех имеющихся кристаллах, выращенных в восьми различных лабораториях и существенно различающихся по содержанию примесей, а также на выращенных газотранспортным методом монокристаллических эпитаксиальных слоях MgO повышенной чистоты. Интенсивность люминесценции на длине волны 162 нм была больше в образцах с меньшей концентрацией примесей (рис. 4).

В последние годы существенно возрос интерес к оксиду цинка (ZnO) как к материалу, перспективно-



Рис. 5. Спектры катодолюминесценции легированного медью (1), нелегированного после термообработки (2) и исходного (3) образцов ZnO при 300 К. Ток электронного пучка 1 мкА, ускоряющее напряжение 20 кэВ

му для создания светоизлучающих структур в ультрафиолетовой области спектра [30, 31].

Оксид цинка — широкозонный полупроводник, перспективный для коротковолновой оптоэлектроники. Данный полупроводник является многообещающим функциональным материалом с обширной сферой применения, например, в качестве катализаторов, эффективных многоцветных фосфоров, светоизлучающих диодов и лазеров с регулируемой в зависимости от размера частиц длиной волны излучаемого света. Спектры катодолюминесценции оксида цинка ZnO состоят из узкой краевой ультрафиолетовой полосы на длине волны около 385 нм и широкой зеленой полосы с максимумом на длине волны ~500 нм (рис. 5). В одних работах эта зеленая полоса связывается с неконтролируемой примесью меди [32-36], тогда как в других работах она объясняется однократно заряженными вакансиями кислорода [31, 35, 37, 38].

Рост энергии электронов в пучке ведет к незначительному увеличению относительной интенсивности зеленого свечения без изменения ее полуширины. При этом краевое экситонное УФ свечение существенно преобладает.

Также было показано, что с уменьшением размера частиц наблюдается смещение положения пика экситонной люминесценции в коротковолновую область, что объясняется эффектом размерного квантования [39].

# Фотонные кристаллы

В настоящее время все больший интерес в области оптоэлектроники уделяется фотонным кристаллам. Фотонными кристаллами принято называть среды, у которых диэлектрическая проницаемость периодически меняется в пространстве с периодом, допускающим брэгговскую дифракцию света [40].

Благодаря периодическому изменению коэффициента преломления в фотонных кристаллах образуются запрещенные зоны для энергий фотонов, ана-

логично полупроводниковым материалам, в которых наблюдаются разрешенные и запрешенные зоны для энергий носителей заряда [41, 42]. Если излучение с частотой запрещенной зоны было сгенерировано внутри такого фотонного кристалла, то оно не может распространяться в нем; если же такое излучение посылается извне, то оно просто отражается от фотонного кристалла. Данное свойство фотонных кристаллов открывает огромные, недоступные ранее, возможности управления свойствами излучения. Оно позволяет достигать широкого одномодового диапазона, уникальных дисперсионных характеристик и их сильной зависимости от геометрических параметров образца, большого нелинейного коэффициента за счет сильной локализации поля, увеличенного двулучепреломления. Эти свойства находят широкое применение в телекоммуникациях, метрологии, нелинейной оптике, атомной и медицинской оптике.

Фотонные кристаллы можно разделить на одномерные, двумерные и трехмерные (рис. 6) [42]. В данных типах кристаллов коэффициент преломления изменяется в одном, двух, трех пространственных направлениях соответственно.

Возможность формирования запрещенных фотонных зон в периодических структурах была впервые установлена в работе В. П. Быкова [47]. В дальнейшем особенности фотонных зон анализировались в работах Э. Яблоновича [48] и С. Джона [49].

В настоящее время на основе волновой теории и уравнений Максвелла разработаны методы теоретического исследования фотонных кристаллов, а также численные методы и программное обеспечение для изучения их свойств [43].

Механизм образования запрещенных зон состоит в интерференционном сложении парциальных волн, отраженных от периодически повторяющихся границ слоев [44]. Как уже отмечалось выше, этот эффект называется брэгговским отражением от объемной периодической структуры. При нормальном падении света на границу раздела максимально эффективное отражение происходит при условии, что оптический период  $\Lambda_{\text{оп}}$  структуры удовлетворяет условию  $\Lambda_{\text{оп}} = \lambda/2$ . Для двухслойной среды при этом оптимальным является случай, когда оптическая толщина каждого слоя равна  $\lambda/4$  (четвертьволновое условие). В этом случае разность набегов фаз, отраженных от соседних слоев волн, равна 0 либо  $2\pi$ .

Помимо рассмотрения фотонных кристаллов как материалов, способных отражать некоторые волны



Рис. 6. Схематические представления одномерного, двумерного и трехмерного фотонных кристаллов

частоты заданного спектра при одновременном пропускании оптических волн других диапазонов, ведутся многочисленные исследования о применении фотонных кристаллов в качестве преобразователей частоты исходного светового пучка в желательный диапазон спектра.

Преобразование длины волны излучения с помощью фотонных кристаллов возможно благодаря уникальным нелинейным и дисперсионным свойствам таких волокон [44]. Так, в работе В. С. Горелика и А. А. Есакова [45] приведены экспериментальные данные, согласно которым при возбуждении фотонного кристалла, изготовленного из опала, гигантским импульсом рубинового лазера в нем возникало антистоксовое сине-зеленое свечение, интенсивность которого в момент лазерного импульса была сравнима с интенсивностью накачки. Вторичное излучение в сине-зеленой области спектра присутствовало в опале и после лазерного импульса длительностью 20 нс в течение 3...5 с.

Другая важная особенность наблюдаемого вторичного излучения состояла в том, что оно наблюдалось не только в образце, внутри которого было зафиксировано возбуждающее излучение, но и в образцах, расположенных около возбуждаемого кристалла на расстоянии нескольких миллиметров.

Эффект наиболее выразительно проявлялся при низких температурах образца (близких к температуре кипения азота). Интенсивность сине-зеленого свечения резко изменялась в зависимости от ориентации образца. Наблюдаемый эффект носил пороговый характер и начинал проявляться при плотности мощности на образце 10<sup>7</sup> Вт/см<sup>2</sup>.

В качестве преобразователей частоты можно использовать и двумерные фотонные кристаллы. Множество работ посвящены исследованию микроструктурных волокон [50—54].

Свет, распространяющийся внутри центральной части волокна, заполненной определенным газом, возбуждает стоксовы и антистоксовые компоненты излучения. Переизлучение света на пониженной частоте (если мы, например, хотим преобразовать излучение видимого диапазона в ультрафиолет), как правило, дает довольно слабый эффект, однако в случае оптического волокна он усиливается за счет большой длины, на которой происходит взаимодействие (по всей длине волокна), а также за счет ло-кального усиления электрического поля, которое в двумерном фотонном кристалле значительно превосходит усиление в обычном оптоволокне.

Также в последнее время проводятся многочисленные исследования по созданию ультрафиолетового лазера на основе фотонных кристаллов. В статье [46] авторы рассказывают о том, что ими впервые был получен фотонный кристаллический лазер на основе оксида цинка, излучающий в ближнем ультрафиолетовом диапазоне при комнатной температуре. В ходе проведения эксперимента исследователями были изготовлены фотонные кристаллы из пленок ZnO с постоянной решетки 130 нм и радиусом полого цилиндра 33 нм. Далее образцы были подвергнуты оптической накачке третьей гармоникой лазера Nd:YAG (355 нм, 10 Гц, 20 пс) при комнатной температуре. При этом спектр излучения фотонного кристалла имел единственный узкий пик на длине волны 387,7 нм. С помощью измерений частоты излучения и пространственного профиля излучающих мод, а также численных вычислений структуры запрещенной фотонной зоны исследователи пришли к выводу, что ультрафиолетовое излучение объясняется мелкими дефектами структуры, которые неумышленно были введены в процессе изготовления образца.

Таким образом, благодаря своим особым свойствам фотонные кристаллы могут найти широкое применение в качестве преобразователей светового излучения, в том числе и в качестве эффективного преобразователя видимого света в ультрафиолетовый диапазон.

## Список литературы

1. **Кривоносов П. В.** Лампы люминесцентные, разрядные, светодиодные и прочие // ЭкспертЮнион светотехническое сообщество. 2007. (www.expertunion.ru/istochniki-sveta).

2. Соснин Э. А. Закономерности развития газоразрядных источников спонтанного излучения: руководство для разработчика. Томск: Изд-во Томского ун-та. 2004. 108 с.

3. **Герус В. Л.** Физические основы электронно-лучевых приборов. М.: Физматлит, 1993. 352 с.

4. Лейченко А. С., Шешин Е. П., Щука А. А. Наноструктурные углеродные материалы в катодолюминесцентных источниках света // Электроника: Средства отображения информации. 2007. № 6. С. 94—101.

5. Kang W. P., Davidson J. L., Wisitsora-at A. et al. Field emission lighting element presented by SI Diamond Technology // Diamond and Related Materials. 2004. Vol. 13. P. 1944–1948.

6. Шешин Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Изд. МФТИ. 2001. 287 с.

7. Filip V., Nicolaescu D., Tanemura M., Okuyama F. Influence of the electronic structure on the field electron emission from carbon nanotubes // Journal of vacuum scence & Technology B. JAN-FEB 2003. Vol. 1. N 21. P. 382–390.

8. Saito Y., Hata K., Takakura A., Yotani J., Uemura S. Field emission of carbon nanotubes and its application as electron sources of ultra-high luminance light-source devices // Physica B-condensed matter. OCT 2002. Vol. 323. P. 30–37.

9. **Obraztsoy A. N., Pavlovsky I. Yu., Volkov A. P.** Prototype of light emitting device with thin film cold cathodes // EuroDisplay'99. Proc. of 19<sup>th</sup> Int. Display Res. Conf., Berlin, Germany. 1999. P. 229–231.

10. Волков А. П., Образцов А. Н., Павловский И. Ю. и др. Катодолюминесценция углеродных пленок, полученных методом газофазного химического осаждения // Поверхность. 1999. № 5. С. 161—166.

11. **Obraztsov A. N., Volkov A. P.** Synthesis, characterization and application of thin film carbon nanotube material // MRS Symp. Proc. 2001. Vol. 633. P. 22–27.

12. Sheshin E. P., Suvorov A. L., Grigoriev V. A., Sheshjorkin V. J. Light Source On The Basis Of Multitip Field Emission Cathode From Carbon Materials // Abst. Of Sixth hit. Vac. Microelectron. Conf. 1993. Newport, USA. P. 117–118.

13. **Sheshin E. P., Suvorov A. L., Bobkov A. F., Dolin D. E.** Light Source on The Basis of Multitip Field Emission Cathode From Carbon Materials // Abst. Of 7th Int. Vac. Microelectron. Conf. 1994. Grenoble, France. P. 423–426.

14. **Baturin A. S., Eskin I. N., Trufanov A. I.** et al. Electron gun with field emission cathode of carbon fiber bundle // J. Vac. Sci. Technol. 2003. V. B21. N 1. P. 354—357.

15. Baker F. S., Osbom A. R., Williams J. The Carbon fiber field emitter // J. Phys. D, Appl. Phys. 1974. Vol. 7. N 15. P. 2105–2115.

16. **Watt W.** Production and properties of high modulus carbon fibres // Proceeding of the Royal Society. 1970. N 1536. P. 5.

17. Sheshin E. P. Field emission of carbon fibers // Ultramicroscopy. 1999. Vol. 79. P. 101–108.

18. Бондаренко Б. В., Рыбаков Ю. Л., Шешин Е. П. Автоэлектронная эмиссия углеродного волокна // Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27. № 8. С. 1593.

19. Шешин Е. П., Рыбаков Ю. Л. Автоэлектронные катоды из углеродных волокон // Тез. докл. XVIII Всесоюзной конф. по эмиссионной электронике. М.: Наука. 1981. С. 213—214.

20. Бондаренко Б. В., Макуха В. И., Шешин Е. П. Стабильность эмиссии и долговечность некоторых вариантов автокатодов // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. № 8. С. 1649.

21. Peterson R. O. Field emission // Information Display. 1997. Vol. 13. N 3. P. 22–24.

22. Попов Ю. М. и др. Эффективность люминофоров // Труды ФИАН. 1961. Т. 41. С. 27—32.

23. Pines D. Elementary excitation in solids. N. Y. 1963. 322 p. 24. Yamamoto H., Tonomyra A. Electron energy loss spectra and efficiencies of cathode-ray phosphors // J. of Lumin. 1976. Vol. 2. N 13. P. 947.

25. Сощин Н. П. Спектры люминесценции широкозонных люминофоров // Изв. АН СССР. Сер. Физика. 1974. Т. 38. № 6. С. 1153—1156.

26. **Robbins D. J.** On Predicting the Maximum Efficiency of Phosphor Systems Excited by Ionizing Radiation // J. Electrochem. Soc. 1980. Vol. 127. N 12. P. 2694–2702.

27. Сощин Н., Большухин В. Люминофоры решают все в плоскостных индикаторах // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2001. Т. 1. С. 54—57.

28. Валбис Я. А., Рачко З. А., Янсонс Я. Л. Коротковолновая ультрафиолетовая люминесценция кристаллов BaF<sub>2</sub>, обусловленная перекрестными переходами // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 42. Вып. 4. С. 140—142.

29. Валбис Я. А. и др. Краевая люминесценция экситонов в кристаллах MgO в вакуумной ультрафиолетовой области спектра // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 22. Вып. 2. С. 83-85.

30. **Ruy Y. R., Zhu S., Budai Y. D., Chandrasekhar H. R.** et al. Optical and structural properties of ZnO films deposited on GaAs by pulsed laser deposition // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 88. P. 201.

31. Leiter F., Zhou H., Henecker F., Hoffstaetter A., Hofmann D. M. et al. Magnetic resonance experiments on the green emission in undoped ZnO crystals // Physica B. 2001. Vol. 908. P. 308–310.

32. **Dingle R.** Luminescent Transitions Associated With Divalent Copper Impurities and the Green Emission from Semiconducting Zinc Oxide Phys // Rev. Lett. 1969. Vol. 23. P. 309.

33. Broser I., Germer R., Shulz H. I., Wisznewski K. Fine structure and Zeeman effect of the excited state of the green emitting copper centre in zinc oxide // Sol. St. Electron. 1978. Vol. 21. P. 1579.

34. **Kuhnert R., Helbig R.** Vibronic structure of the green photoluminescence due to copper impurities in ZnO // J. Luminesc. 1981. Vol. 26. P. 203.

35. **Robbins D. J., Herbert D. C., Dean P. J.** The origin of the  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  blue no-phonon transitions in ZnO : Cu—A deep-level problem // J. Phys. C. 1981. Vol. 14. P. 2859.

36. **Кузмина И. П., Никитенко В. А.** Окись цинка. Получение и оптические свойства. М.: Наука. 1984. 165 с.

37. Vanheusden K., Warren W. L., Seager C. H., Tallant D. R. Green photoluminescence efficiency and free-carrier density in ZnO phosphor powders prepared by spray pyrolysis // Appl. Phys. 1996. Vol. 79. P. 79–83.

38. **Zhang S. B., Wei S.-H., Zunger A.** Intrinsic *n*-type versus *p*-type doping asymmetry and the defect physics of ZnO // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 63. P. 75–85.

39. Lin K. F., Cheng H. M., Hsu H. C. et al. Changes of structure and optical energy gap induced by oxygen pressure during the deposition of ZnO films // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 109–112.

40. **Ивченко Е. Л., Поддубный А. Н.** Резонансные трехмерные фотонные кристаллы // Физика твердого тела. 2006. Т. 48. Вып. 3. С. 540–547.

41. **Кособукин В. А.** Фотонные кристаллы // Окно в Микромир. 2002. № 4.

42. Johnson S. G. Photonic Crystals: Periodic Surprises in Electromagnetism // Encyclopedia of Modern Optics. Oxford: Elsevier. 2004. P. 120–127.

43. **Reisinger A.** Characteristics of optical guided modes in lossy waveguides // Appl. Opt. Vol. 12. 1973. P. 1015–1073.

44. Рябко М. В., Никитов С. А., Чаморовский Ю. К. Микроструктурные волокна // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 5. С. 33–43.

45. Горелик В. С., Есаков А. А. Оптика глобулярных фотонных кристаллов. Препринт ФИАН № 32. М., 2006. 67 с.

46. Wu X., Yamilov A., Liu X., Li S. et al. Ultraviolet photonic crystal laser // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 85. N 17. P. 3657–3659.

47. **Bykov V. P.** Spontaneous Emission in a Periodic Structure // Soviet Physics JETP. 1972. Vol. 35. P. 269.

48. **Yablonovitch E.** Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58. P. 2059.

49. John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58. P. 2486.

50. **Beloglazov V. I., Soukhoveev S. P., Suetin N. V.** Threedimensional micron and submicronstructures based on fiberglass technologies // Indo-Russian Workshop on Micromechanical Systems. New-Dehli, India. SPIE. 1999. Vol. 3903. P. 134–140.

51. Белоглазов В. И., Суховеев С. П., Суетин Н. В. Создание микронных и субмикронных трехмерных структур с использованием стекловолоконных технологий // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 6—9.

52. Fedotov A. B., Ivanov A. A., Alfimov M. V., Beloglasov V. I. et al. Tuning the Photonic Band Gap of Sub-500-nm-Pitch Holey Fibers in the 930-1030-nm Range // Laser Physics. 2000. Vol. 10. N 5. P. 1086.

53. Melnikov L. A., Sinichkin Yu. P., Romanova E. A., Elterman I. V. et al. Quasi-1D and -2D photonic crysta and multilayered fibers: manufacturing and theory // International conference proceedings. Praga. May 2000.

54. **Zheltikov A. M., Fedotov A. B., Ivanov A. A., Alfimov M. V.** et al. Holey Fibers 0.4-32 mm-Lattice-Consultant Photonic Band-Gap Cladding: Fabrication, Characterization, and non-linear optical Measurments // Laser Physics. 2000. Vol. 10. N 5. P. 1086.

УДК 544.142; 004.3

**А. А. Потапов**, д-р хим. наук, проф., гл. науч. сотр., Институт динамики систем и теории управления СО РАН, г. Иркутск, e-mail: matrimm@yandex.ru

# РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ СВЯЗИ ПРОСТЫХ ГИДРИДОВ ЭЛЕМЕНТОВ ТАБЛИЦЫ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

Предложена простая электростатическая модель химической связи. Получено соответствующее уравнение, которое апробировано на примере простых гидридов элементов таблицы Менделеева.

**Ключевые слова:** атомно-молекулярная сборка, прочность связи, энергия связи, нанотехнологии, модели

Потенциальные возможности нанотехнологии так или иначе связаны с реализацией технологии контролируемой атомно-молекулярной сборки (механосинтеза). Очевидно, что успех "внедрения" ее в практику самым непосредственным образом зависит от уровня понимания природы химической связи и механизмов ее формирования [1]. Химическая связь причинно обусловлена свойствами и электронным строением атомов, образующих молекулу или химическое соединение. В работе [2] предложена простая и наглядная модель химической связи, которая основана на разрабатываемой автором диполь-оболочечной модели атомов [3]. Данный подход апробирован на примере гомоядерных молекул, образуемых атомами I группы таблицы Менделеева [2]. Настоящая работа является логическим продолжением начатых исследований химической связи как основы технологии атомно-молекулярной сборки будущих наноконструкций.

Гидриды элементов (НЭ) имеют предельно простую структуру среди гетероатомных молекул. Данное обстоятельство предопределило первоочередность изучения химической связи этого класса молекул (вслед за гомоядерными двухатомными молекулами [2]). Гидриды элементов достаточно хорошо изучены и для них имеются справочные данные по длинам связи и энергиям диссоциации молекул [4, 5]. Простые гидриды известны для всех элементов за исключением благородных газов и некоторых металлов [6, с. 558]. Данное обстоятельство допускает возможность проведения систематических исследований свойств гидридов элементов в периодических рядах (по группам и периодам таблицы Менделеева). При изучении химической связи гидридов элементов будем исходить из общепринятых представлений об их электрической природе [7], а также руководствоваться принципом причинной обусловленности свойств химической связи свойствами и электронным строением атомов, вступающих в химическую связь.

В работе [2] была предложена модель химической связи, основанная на обобществлении пары электронов, предоставляемых атомами, которые образуют молекулу. В приложении к молекулам НЭ эта модель предполагает обобществление электрона атома водорода H с одним из электронов элемента Э на общей квазиэллиптической орбите (рис. 1).

Устойчивость молекул НЭ достигается в результате баланса сил притяжения между остовом атома Э и электроном 2 плюс между протоном водорода Н и электроном 1, с одной стороны, и сил отталкивания между остовом атома Э и протоном. Согласно диполь-оболочечной модели остов атома Э имеет единичный положительный заряд +e. На основании уравнения баланса сил на линии связи имеем

$$u = \frac{-e^2}{a_{\rm H} + l} - \frac{e^2}{a_{\Im} + l} + \frac{e^2}{l}, \qquad (1)$$

где  $a_{\rm H}$  — радиус атома водорода H; l — расстояние между остовом атома Э и протоном H;  $a_{\rm H}$  — радиус атома Э.

Данные расчета энергии связи атомов Э и Н сведены в табл. 1. На основании этих данных построены графики зависимостей энергии связи *и* от номера



Период	Элемент	<i>l</i> , E	<i>a</i> , Å	<i>D</i> , эВ	и, эВ
1	Н	0,74	0,53	4,74	_
	Li	1,59	1,75	2,4	2,1
	Be	1,30	0,89	2,1	3,3
	В	1,34	0,70	3,5	4,0
2	С	1,12	0,58	3,5	4,4
	Ν	1,04	0,49	3,3	4,7
	0	0,97	0,43	4,4	5,0
	F	0,92	0,38	5,9	5,4
	Na	1,89	1,35	2,0	2,2
	Mg	1,73	0,88	1,4	3,5
	Al	1,65	0,75	3,0	3,9
3	Si	1,52	0,66	3,0	4,1
	Р	1,43	0,58	3,2	4,5
	S	1,34	0,52	3,6	4,7
	Cl	1,27	0,48	4,5	4,9
	К	2,24	2,14	1,8	2,1
	Ca	2,0	1,07	1,7	3,2
	Ga	1,66	1,2	2,8	2,9
4	Go	1,54	0,35	3,2	3,4
	As	1,52	0,77	2,3	3,8
	Sc	1,46	0,65	3,2	4,2
	Br	1,41	0,57	3,7	4,3
	Rb	2,37	2,19	1,8	2,0
	Sr	2,15	1,09	1,7	3,1
	In	1,84	1,95	2,5	3,0
5	Sn	1,77	1,0	2,6	3,3
	Sb	1,70	0,85	2,7	3,6
	Te	1,66	0,75	2,4	3,8
	Ι	1,61	0,7	3,1	3,9
(	Cs	2,49	2,38	1,8	1,9
6	Be	2,23	1,19	1,8	2,9
1					

Таблица 1

N атома в периодах (рис. 2, *a*) и в группах (рис. 2, *б*). Получено вполне приемлемое согласие с данными по энергиям диссоциации D, подтверждающее правомерность уравнения (1) и принятой при его выводе электростатической модели. Уровень согласования рассчитываемых и экспериментальных данных ограничивается на сегодняшний день погрешностью измерения величины D, которая может достигать 20 % и более [4].

В принципиальном отношении уравнение (1) может быть уточнено введением поправок на эффект экранирования и на асимметрию параметров квазиэллиптической орбиты [2]. Для гидридов атомов эти поправки оказываются меньшими по сравнению с гомоядерными, рассмотренными в работе [2]. Тем более, что на данном этапе исследований важным представляется установление общих закономерностей в формировании химической связи молекул.

Из представленных на рис. 2, a графиков видно, что поведение энергии связи атомов в зависимости от порядкового номера N атома в каждом из периодов таблицы Менделеева имеет вполне регулярный и предсказуемый характер. Их значения u закономерно увеличиваются по мере увеличения порядкового номера N атома в периоде, отражая тем самым ре-



- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 2, 2010 -

зультат увеличения заряда остова атома и соответствующее ему уменьшение межатомного расстояния в молекулах гидридов. Крутизна зависимостей u(N)снижается при переходе от периода 2 к последующим периодам, что объясняется увеличением соответствующих межатомных расстояний и как следствие этого — уменьшением энергии связи молекул. Обращает на себя внимание тот факт, что зависимости u(N) периодов 2 и 3 почти совпадают, отражая тем самым структурную идентичность этих периодов. Приблизительно такое же поведение наблюдается и у зависимостей u(N) периодов 4 и 5. Отличие в том, что при N = 2 у этих зависимостей имеет место характерный излом, обусловленный дополнительным заполнением внутренних оболочек [3]. Наклон зависимости u(N) для N = 1...2 у всех молекул приблизительно одинаков, что свидетельствует о структурной идентичности химической связи. С увеличением порядкового номера N атома Э линейность зависимости u(N) нарушается в связи с переходом от круговых орбит электронов к эллиптическим [3].

На рис. 2, б приведены зависимости энергии связи молекул от порядкового номера *n* атома Э в *N*-й группе. Относительно гладкие зависимости u(n) наблюдаются у молекул НЭ, образуемых атомами I и II групп, что, по-видимому, связано со спецификой круговых орбит этих атомов. Остальные зависимости носят существенно нерегулярный характер, связанный с тем, что при переходе к периоду 4 и последующим периодам, начиная с III группы, изменяется способ формирования атомов. Сначала идет заполнение внутренних оболочек так называемыми d- и f-электронами при фиксированном числе валентных электронов, и только после заполнения внутренних оболочек восстанавливается процесс заполнения внешних оболочек атомов. Такой характер формирования электронных оболочек неизбежно приводит к нарушению аддитивности энергий и в ряду п. На рис. 2, б данное обстоятельство проявляется в скачках энергии u на участке n = 2...3.

В целом зависимости u(N, n) на рис. 2 иллюстрируют характер формирования химической связи гидридов элементов. Интенсивность связи (прочность) всецело определяется параметрами исходных атомов — зарядами их остовов и их геометрией. Общая тенденция такова, что прочность сцепления атомов возрастает по мере уменьшения радиуса атомов Э.

Анализ полученных данных по энергиям связи *и* простейших двухатомных гидридов элементов показывает, что формирование химической связи имеет единообразный характер, соответствующий принятой для них двухцентровой электростатической модели. Данный вывод подтверждается корректностью описания данной модели по формуле (1) для всех двухатомных гидридов элементов. В этом отношении принятую в настоящее время классификацию гидридов по признаку различия механизма образования химической связи (ионной, ковалентной, металлической [8, 9]) нельзя признать корректной и приемлемой для практического применения.

Более логичной выглядит систематизация двухатомных гидридов по признаку их валентности. Гидриды, образованные атомами I и VII групп таблицы Менделеева, представляют собой простейшие молекулы. Молекулы типа  $H\Theta_I$  (гидриды атомов щелочных металлов) имеют относительно небольшую энергию связи и тем самым предопределяют свою приверженность к образованию металлических систем в процессе их возможного объединения (конденсации).

Молекулы типа  $H\Theta_{VII}$  (галогеноводороды) имеют наибольшую в соответствующих периодах энергию связи и являются устойчивыми структурными образованиями. Молекулы  $H\Theta_I$  и  $H\Theta_{VII}$  по определению имеют нулевую валентность. Молекулы типа  $H\Theta_I$ образуются путем обобществления валентных электронов атомов на общей (молекулярной) эллиптической орбите. Молекулы типа  $H\Theta_{VII}$  образуются в результате объединения единственно свободной эллиптической орбиты галогена с круговой орбитой атома водорода. В обоих случаях реализуется обычная ковалентная связь.

Двухатомные гидриды атомов II—VI групп представляют радикалы с валентностью от 1 до 3. Гидриды атомов II группы образуются в результате ковалентной связи электрона водорода с одним из электронов атома  $\Im_{II}$  путем создания общей для них эллиптической орбиты. Оставшийся "незадействованный" валентный электрон определяет валентность радикала, равной 1. Аналогичным образом формируются гидриды атомов III и IV групп; гидриды типа Н $\Im_{III}$  имеют валентность 2, а гидриды Н $\Im_{IV}$ — валентность 3. При этом валентность радикала определяется числом незанятых эллиптических орбит атома  $\Im$ , т. е. валентностью атома  $\Im$  минус единица.

Гидриды атомов V и VI групп имеют валентность соответственно 2 и 1. Атомы  $\Im_V$  имеют одну двухэлектронную орбиту и три одноэлектронных орбиты (в соответствии с диполь-оболочечной моделью [3]). Одна из орбит атома  $\Im_V$  объединяется с круговой орбитой атома водорода, образуя ковалентную связь радикала  $H \Im_V$ . Оставшиеся две одноэлектронные орбиты определяют их валентность 2. Атомы  $\Im_V$ имеют две двухэлектронные орбиты и две одноэлектронные орбиты; одна из одноэлектронных орбит и электрон водорода формируют ковалентную связь, а оставшаяся одноэлектронная орбита определяет валентность радикала  $H \Im_V$ , равную 1.

Валентность радикалов объясняет их высокую химическую активность. Вместе с тем, понимание валентности атомов и радикалов НЭ как числа одноэлектронных орбит двухатомных гидридов позволяет объяснить так называемый закон смещения гидридов [9]. Небезынтересным представляются результаты сравнения длин связи двухатомных радикалов  $H \Im_{II}$  и их катионов  $H \Im_{II}^+$ ; их различие находится в пределах 0,1 Å [5, с. 60], что может свидетельствовать об относительной независимости химических связей многоатомных молекул.

**Трехатомные гидриды**, типа  $H \Im_{II}$ , и четырехатомные гидриды, типа  $H \Im_{III}$ , неустойчивы. Имеющиеся сведения о структуре этих классов гидридов относятся к их конденсированному состоянию [8, 9]. Фактическое отсутствие данных о молекулярном строении этого класса гидридов объясняется их высокой химической активностью. Согласно дипольоболочечной модели,  $H_2 \boldsymbol{\Im}_{II}$  представляют собой линейные молекулы с двумя ковалентными Н-Э связями, симметричными относительно атома Эп. Гидриды H<sub>3</sub>Э<sub>III</sub> — это плоские тригональные молекулы, образуемые тремя ковалентными связями Н-Э. Особенность этих молекул заключается в том, что их структурообразующие атомы  $\Im_{II}$  и  $\Im_{III}$  имеют открытые поверхности, допускающие прямой контакт с другими окружающими микрочастицами. Данное обстоятельство объясняет их высокую активность, что резко ограничивает экспериментальные возможности в получении структурных данных молекулярных трех- и четырехатомных гидридов элементов.

Имеющиеся ориентировочные данные l = 1,34 Å = = 0,134 нм для BeH<sub>2</sub> позволяют оценить энергию связи по формуле (1):  $u \approx 3,5$  эВ. Длина связи молекулы BeH<sub>2</sub> и радикалов BeH и BeH<sup>+</sup> находится в пределах 1,31...1,34 Å [4, 5].

Пятиатомные гидриды  $\Im_{IV}H_4$ . Согласно дипольоболочечной модели атомы  $\Im_{IV}$  IV группы имеют тетраэдрическое строение, которое предопределяет соответствующее строение молекул типа  $\Im_{IV}H_4$ . Это означает, что пятиатомные гидриды представляют собой устойчивые молекулы, имеющие четыре ковалентные связи. Устойчивость гидридов  $\Im_{IV}H_4$  является следствием их правильной тетраэдрической структуры, которая обеспечивает эффективное экранирование центрального (структурообразующего) ато-

Молекула	<i>l</i> , Å	<i>D</i> , эВ	<i>a</i> , Å	и, эВ
CH <sub>4</sub>	1,09	4,4	0,58	4,5
SiH <sub>4</sub>	1,48	4,2	0,66	4,1
GeH <sub>4</sub>	1,52	2,9	0,95	3,3
SnH <sub>4</sub>	1,69	_	1,0	3,3
NH <sub>3</sub>	1,03	4,6	0,43	4,7
PH <sub>3</sub>	1,41	30,6	0,58	4,4
AsH <sub>3</sub>	1,51	3,2	0,77	3,8
SbH <sub>3</sub>	1,71	_	0,85	3,6
H <sub>2</sub> O	0,96	5,2	0,43	5,1
H <sub>2</sub> S	1,33	4,0	0,52	4,7
H <sub>2</sub> Se	1,46	—	0,65	4,2
H <sub>2</sub> Te	1,69	—	0,75	3,5

Таблица 2

ма  $\Im_{IV}$  от прямых контактов с молекулярным окружением. Данное обстоятельство создает необходимые условия для постановки измерений и получения экспериментальных данных по длинам *l* и энергиям диссоциации  $\mathcal{D}$  молекулярных гидридов  $\Im_{IV}H_4$  (табл. 2).

Рассчитанные по формуле (1) энергии связи находятся в удовлетворительном согласии со значениями  $\mathcal{D}$  (табл. 2), что может свидетельствовать о правомерности принятой модели независимых электронных орбит атомов Э<sub>IV</sub>. Этот вывод также подтверждают данные по длинам связи гидридов (молекул и радикалов, которые в пределах погрешности эксперимента имеют одинаковые значения l = 1,08 Å для CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub> и CH<sub>4</sub>; l = 1,48 Å для SiH<sub>2</sub>, SiH<sub>3</sub> и SiH<sub>4</sub>) [4, 5].

Шестиатомные гидриды. У этого класса гидридов структурообразующим атомом являются атомы V группы таблицы Менделеева. Согласно дипольоболочечной модели атомы V группы имеют пять валентных электронов, образующих пять независимых одноэлектронных эллиптических орбит. Две из них располагаются вдоль диагонали воображаемого куба; их электроны совместно с положительно заряженным остовом образуют пару одинаковых и разнонаправленных дипольных моментов, которые в силу симметричной конфигурации обеспечивают им электрическую нейтральность и соответственно предельно низкую химическую активность. Остальные три электрона совместно с остовом атома образуют локальные нескомпенсированные в пространстве дипольные моменты, которые выступают в роли притягивающих центров, обеспечивающих саму возможность образования химической связи. При такой трехвалентной конфигурации атомов V группы возможна организация молекул типа Э<sub>V</sub>H<sub>3</sub>, которые имеют по три ковалентные связи Э-Н.

Данные по l и D гидридов приведены в табл. 2. Здесь же даны рассчитанные по формуле (1) энергии связи. С учетом неопределенности данных по энергиям диссоциации согласие между величинами u и Dможно считать вполне удовлетворительным. Тем самым и для шести атомных молекулярных гидридов удовлетворяется принятая при выводе уравнения (1) двухцентровая модель химической связи. Равенство длины связи молекул гидридов и их одновалентных радикалов ( $l \approx 1,03$  Å для NH<sub>2</sub> и NH<sub>3</sub>; l = 1,42 Å для PH<sub>2</sub> и PH<sub>3</sub>;  $l \approx 1,52$  Å для AsH<sub>2</sub> и AsH<sub>3</sub> [4, 5]) также может служить тому подтверждением.

Семиатомные гидриды. Структуробразующими этого класса гидридов выступают атомы VI группы. Согласно диполь-оболочечной модели атомы VI группы имеют шесть валентных электронов, из которых две пары электронов выстраиваются вдоль двух диагоналей куба и два электрона занимают две вершины из оставшихся четырех вершин данного воображаемого куба [3]. В результате две пары электронов образуют две пары одинаковых и разнонаправленных дипольных момента, которые обеспечивают атомам вдоль этих направлений электрическую нейтральность. Оставшиеся два электрона совместно с остовом атома образуют два локальных диполя, выступающих в роли аттракторов заряженных микрочастиц и определяющих валентность атомов  $\Im_{VI}$ . Данная электронная конфигурация предопределяет строение молекул  $H_2 \Im_{VI}$  с двумя ковалентными связями  $H-\Im$ .

Экспериментальные данные по l и D этих молекулярных гидридов также приведены в табл. 2. Здесь же приведены рассчитанные по уравнению (1) энергии связи u, которые находятся в удовлетворительном согласии с данными по энергиям диссоциации.

Ионизация гидридов элементов в подавляющем большинстве случаев приводит к увеличению энергии диссоциации [4, 5]. Этот эффект можно объяснить тем, что удаление одного из электронов элемента Э приводит к уменьшению энергии отталкивания между несвязевыми электронами и как следствие этого — к увеличению энергии связи этих электронов с остовом атома Э (потенциала ионизации), что, в свою очередь, приводит к уменьшению радиуса  $a_3$  катиона Э<sup>+</sup> и в соответствии с уравнением (1) увеличению энергии связи за счет увеличения энергии притяжения связевых электронов остовом (первый член в уравнении (1)).

**Гидриды переходных металлов.** Внешние оболочки переходных металлов имеют преимущественно по два электрона (реже по одному). Образование этих элементов идет путем заполнения внутренних оболочек атомов. Поэтому их свойства, в том числе способность к образованию химических связей, изменяются в относительно небольших пределах и близки к свойствам щелочных и щелочноземельных атомов. Очевидно, что природа и механизм формирования химической связи гидридов переходных металлов такие же, как у гидридов рассмотренных выше элементов. Данные по гидридам переходных металлов недостаточны для выполнения расчета их энергии связи.

Таким образом, данные расчета энергии связи гидридов атомов, основанные на простейшей двухцентровой модели электростатического взаимодействия зарядов атома водорода с атомами таблицы Менделеева, согласуются с имеющимися данными по энергиям диссоциации. Установлено, что химическая связь молекулярных гидридов различается только количественно, оставаясь по механизму своего формирования чисто ковалентной. Гидриды атомов могут служить наглядным примером генетической обусловленности свойств и строения молекул структурой составляющих их атомов. И главное: предлагаемая модель подтверждает электростатическую природу химической связи и объясняет механизм формирования химической связи на основании гипотезы дипольного строения атомов, которые в силу диполь-дипольного взаимодействия, стремятся к объединению.

#### Список литературы

1. Потапов А. А. Научные основы нанотехнологии // Нанотехника. 2009. № 1. С. 8—26.

2. Потапов А. А. Расчет прочности связи гомоядерных молекул, образуемых атомами I группы таблицы Д. И. Менделеева // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 1. С. 49—54.

3. Потапов А. А. Электронное строение атомов. Москва — Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика. 2009. 264 с.

4. **Свойства** неорганических соединений: справочник. Л.: Химия, 1983. 392 с.

5. Бацанов С. С. Структурная химия. Факты и зависимости. М.: Диалог — МГУ, 2000. 292 с.

6. Химическая энциклопедия: в 5 т.: Т. 1. М.: Сов. энцикл., 1988. — 623 с.

7. Степанов Н. Ф. Химическая связь в простых двухатомных молекулах // Соросовский образовательный журнал. 1988. № 10. С. 37—43.

8. Гринвуд Н., Эрншо А. Химия элементов: в 2 т. М.: БИНОМ, 2008. 608 с.

9. Жигач А. Ф., Стасиневич Д. С. Химия гидридов. Л.: Химия, 1969. 676 с.

10. Потапов А. А. Радиус и энергия связи атомов и ионов // Нанотехника. (в печати).

# Система на кристалле

УДК 004.3'144:621.3.049.771.15

В. А. Губарев, канд. техн. наук, доц., С. О. Воронков, инженер, Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) (МИРЭА), e-mail: c\_vt@fvms.mirea.ru

# Системное моделирование устройств для реализации в СБИС СнК с применением программыанализатора алгоритмов

Описывается применение программы, вычисляющей количество операций в алгоритме, при моделировании времени выполнения алгоритмов в системных моделях устройств, реализуемых в СБИС СнК.

**Ключевые слова:** СБИС класса "Система на кристалле", системная модель, программа-анализатор

# Введение

Принципиальным отличием сверхбольших интегральных схем класса "система на кристалле" (СБИС СнК) от интегральных схем всех предыдущих уровней интеграции является возможность реализовать в одном чипе или чипсете все основные функциональные элементы полного конечного продукта.

Наличие в составе технического задания для проектной организации системной модели СБИС СнК может в значительной мере ускорить проектирование, с одной стороны, и снизить риск конструкторов конечных продуктов, с другой стороны [1].

Модель выполняется на алгоритмическом языке высокого уровня — обычно *SystemC* и обеспечивает системной организации оценку выполнения системных функций изделия, реализуемого в СБИС СнК, а проектной организации — определение возможности дальнейшего развития СнК с использованием имеющихся технологий САПР.

Системная модель на языке *SystemC* структурно представляет собой совокупность МОДУЛЕЙ, содержащих ПРОЦЕССЫ, соединенных КАНА-ЛАМИ<sup>1</sup>. В ПРОЦЕССАХ моделируется время выполнения соответствующих частей системного алгоритма — задержек, вносимых ПРОЦЕССАМИ в общее время выполнения системной функции [2].

Когда алгоритмы функционирования моделируемых систем представлены в явной аналитической форме, определение задержек возможно аналитическим методом [3].

Методы теории алгоритмов позволяют сравнивать алгоритмы по времени их выполнения на основе функции трудоемкости. При этом под трудоемкостью алгоритма для данной конкретной проблемы понимается число "элементарных" операций, задаваемых алгоритмом в принятой модели вычислений [4].

Число "элементарных" операций в алгоритме может быть определено прямым анализом его исходного текста. Ниже приводится описание программы, определяющей число операций в алгоритмах, написанных на языке С и оформленных в виде функций.

Приняты следующие термины и определения.

Грамматика GC — это грамматика, порождающая подмножество языка С.

Язык L(GC) – язык, порождаемый грамматикой GC.

Анализатор — это программа анализа алгоритмов, записанных на подмножестве языка L(GC), позволяющая определить число операций в алгоритме в зависимости от параметров алгоритма.

Параметр алгоритма — пара "переменная = значение", где переменная — это имя числовой переменной, используемой в алгоритме, но неинициализированной непосредственно в самом алгоритме.

Операция – символьная запись, которая является цепочкой языка L(GC).

Входными данными для анализатора являются:

- исходный текст алгоритма на языке L(GC);
- множество параметров алгоритма PA = {"переменная\_1 = значение", "переменная\_2 = значение", ... "переменная\_N = значение"};
- множество искомых операций ОР.

# Задача анализа, ограничения и методика

Необходимо разработать анализатор для подсчета числа операций из множества OP, учитывающий параметры алгоритма из множества PA в цепочках языка L(GC).

Учитываются только такие условные переходы и циклы, в которых в качестве аргументов выступают переменные типа **int, float, double, bool**.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> МОДУЛЬ, ПРОЦЕСС, КАНАЛ — объекты языка *SystemC*.

Методика анализа заключается в последовательном выполнении следующих действий:

- выделение в алгоритме множества условных переходов и циклов (множество ВА); для удобства анализа обозначим условный переход или цикл как блок, который содержит в себе основные параметры, необходимые для выделения и подсчета операций; множество ВА состоит из блоков;
- определение в алгоритме множества аргументов условных переходов и циклов (множество ВР);
- подсчет числа операций в элементах множества ВА.

# Работа анализатора

Схема работы анализатора представлена на ри-сунке.



- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 2, 2010 –

На первом этапе работы анализатора происходит разбиение исходного текста алгоритма на блоки (выделение множества ВА). Определяется тип каждого блока.

Каждый блок может быть внешним, внутренним или пустым.

Внутренний блок — это блок, который содержится внутри другого блока;

Внешний блок — это блок, который содержит внутри себя другие блоки;

Пустой блок — это блок, который не содержит блоков.

Информация о каждом блоке заносится в таблицу блоков. Формируется таблица переменных. Каждый блок связан с одним или несколькими элементами таблицы переменных. Каждый элемент таблицы переменных может быть связан с одним или несколькими элементами таблицы блоков, поэтому между этими двумя таблицами существует отношение "многие ко многим", которое реализовано в виде вспомогательной таблицы. Каждому из этих типов блоков в процессе анализа ставится в соответствие объект класса Block, определенного на языке Java (см. листинг 1).

# Листинг 1. Пример класс Block, определенного для множества OP{"+", "-", "/", "\*", " < < ", " >> "}

```
class Block{
  List < Block > childrens = new
ArrayList < Block > ();
  private Block parent = null;
  private String name = "";
  private String type = "";
  private Expression expression = null;
  int plusCount = 0;
  int minusCount = 0;
  int multCount = 0;
  int decCount = 0;
  int bitCount = 0;
  public Block(String name) {
  this.name = name;
  System.out.println(name);
  }
  public void addChildren(Block block) {
  block.setParent(this);
  childrens.add(block);
  System.out.println("added block to " +
name + " with name " + block.name);
  }
  public void setParent(Block parent) {
  this.parent = parent;
  }
  public Block getParent() {
  return this.parent;
  }
```

```
public void setType(String type) {
  this.type = type;
  public String getType() {
  return this.type;
  }
  public void setExpression(Expression
expression) {
  this.expression = expression;
  System.out.println("BLOCK EXPR : " +
expression.toString());
  }
  public Expression getExpression() {
  return this.expression;
  public void incMinus() {
  minusCount++;
  public void incPlus() {
  plusCount++;
  1
  public void incMult() {
  multCount++;
  }
  public void incDec() {
  decCount++;
  }
  public void incBit() {
  bitCount++;
  }
  public String getName() {
  return this.name;
  }
  }
```

Класс Block имеет набор методов, необходимых для определения типа блока, добавления к внешнему блоку набора внутренних или пустых блоков, а также содержит набор переменных (например int plusCount = 0;) для подсчета числа операций. Определение множеств BP и PA и таблиц переменных и блоков происходит следующим образом. Параметры алгоритма задаются явно при запуске анализатора, определяют множество РА и заносятся в таблицу переменных. В процессе анализа в таблицу переменных заносятся элементы множества ВР, выделяемых в алгоритме. В процессе анализа таблица переменных дополняется по мере анализа переменных алгоритма. Каждая переменная заносится в таблицу переменных, где хранятся атрибуты этой переменной (имя, тип), а также имя блока, которому принадлежит данная переменная.

На втором этапе формируется связанный список блоков на основании таблицы блоков. Для каждого объекта класса Block строится взаимосвязь с другими блоками на основании типа блока и порядкового номера блока в таблице блоков.

На третьем этапе последовательно определяются значения элементов множества ВР для каждого блока, вычисляются значения для элементов множества ОР текущего блока. Все изменения в множестве ВР заносятся после обработки блока в таблицу переменных. Подсчет количества операций каждого блока начинается после окончания формирования таблиц блоков и переменных и совпадает со считыванием последней цепочки языка L(GC). В листинге 2 представлен фрагмент кода на языке Java — метод **analyzeBloc**k класса, который отвечает за распознавание L(GC).

# Листинг 2. Работа с блоками

```
void
                      analyzeBlock (Block
  public
block) {
  String paramName = "Coeff";
  int param = %PARAM %;
  int mult = %PARAM %;
       (block.getName().contains(param-
  if
Name)) {
  mult = param;
  }
  mainBlock.plusCount
+ = block.plusCount*mult;
  mainBlock.minusCount
+ = block.minusCount*mult;
  mainBlock.multCount
+ = block.multCount*mult;
  mainBlock.decCount
+ = block.decCount*mult;
  mainBlock.bitCount
+ = block.bitCount*mult;
  for (Block blockTmp : block.childrens)
{
  analyzeBlock(blockTmp);
  }
  }
  public void finalAnalize() {
  analyzeBlock(mainBlock);
```

```
System.out.println("+
                                    main-
Block.plusCount);
  System.out.println("-
                                    main-
Block.minusCount);
  System.out.println("*
                                    main-
Block.multCount);
  System.out.println("/
                          :
                              "
                                    main-
Block.decCount);
  System.out.println(" > > or < < : " +</pre>
mainBlock.bitCount);
  }
```

После определения значений элементов множества ОР для каждого блока происходит вычисление суммарных значений элементов множества ОР (числа операций в алгоритме) и выдача результата. На основании полученных результатов, зная время выполнения каждой операции, может быть определено время выполнения алгоритма.

# Инструментарий разработки анализатора

Анализатор разработан на языке Java 6 [6]. В качестве генератора LL(\*) парсера и лексера, позволяющего записывать грамматики в виде EBNF [5] для анализа и распознавания кода использовался свободно-распространяемый генератор ANTLR v.3 [7].

# Список литературы

1. **Немудров В., Мартин Г.** Системы на кристалле. Проектирование и развитие. М.: Техносфера, 2004.

2. **Губарев В. А.** Актуальные вопросы применения современной электронной компонентной базы в системах управления // Вопросы радиотехники. Сер. Вычислительная техника (ЭВТ). 2006. Вып. 2.

3. **Губарев В. А.** Моделирование времени выполнения алгоритмов в системных моделях цифровых устройств, реализуемых в СБИС класса "Система на кристалле" // Нано-и микросистемная техника. 2009. № 11. С. 52—54.

4. **Макконелл Дж.** Основы современных алгоритмов. М.: Техносфера, 2006.

5. **Ахо А., Сети Р., Ульман Д.** Компиляторы. Принципы, технологии, инструменты. М.: Вильямс, 2003.

6. http://java.sun.com.

7. http://antlr.org.

# CONTENTS

Results of experimental researches of alloys on the basis of the aluminium, received in the conditions of moulding with pressed of liquid and crystallising metal under pressure to 400 MPa are resulted. It is shown, that pressure imposing results not only in rapprochement of atoms and indemnification shrinkage foundry, but also to structure change. The analysis of laws of changes of properties gives the information on development of processes at level of the atomno-electronic interactions, essentially expanding possibilities of synthesis of new materials. **Keywords:** densely packed nuclear structures, crystallisation process under pressure, indicators of hardness, the Young's module, elastic restoration, a thermal capacity as function from temperature, dilatometrition, estimations of force of intemuclear communications.

The existing sensors for pressure measurement below atmosphere pressure have a narrow range, low accuracy and short lifetime because there design and methodic of measurement. In this article are suggested the methodic that uses periodical heat transfer in thermo sensor. This one allow on the one hand to increase sensitivity and accuracy and on another hand to decrease time response of the sensor due to the methodic of measurement in a time domain instead of amplitude values.

Keywords: pressure, heat transfer, time domain, MEMS, thermal.

Keywords: thermoelectric modules, thermoelement branch, mechanical strength.

Amelichev V. V., Gamarts I. A., Kasatkin S. I., Lopatin V. V., Murav'ev A. M., Plotnikova N. V., Reznev A. A., Reshetnikov I. A., Chaplygin Yu. A. *Anisotropic Magnetoresistive Transducers Based on Ferromagnetic Nanostructures with Varying Fraction of Cobalt.* 22 Results of research and development of magnetic field and electric current anisotropic magnetoresistive transducers based on thin film metal ferromagnetic nanostructures with varying fraction of cobalt are presented. Keywords: anisotropic magnetoresistive transducers, thin film metal ferromagnetic nanostructures.

Keywords: silicon dioxide, gate dielectric, transition layer, permittivity, nano MOSFET.

**Keywords:** ultraviolet radiation, phosphor, field-emission, field-emission cathode, spectral characteristics, photonic crystal.

Keywords: atom-molecular assemblage, strength of forming, energy of bonding, nanotechnology, model.

# For foreign subscribers:

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

The journal bought since november 1999. Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev

ISSN 1813-8586.

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

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор Т. В. Пчелкина

Сдано в набор 11.12.2009. Подписано в печать 20.01.2010. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,54. Заказ 106. Цена договорная

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 2, 2010 –