

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 621.865.8

П. Г. Михайлов, канд. техн. наук,
Пензенский государственный университет

МИКРОМЕХАНИКА ПРИБОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Статья посвящена новому направлению в измерительной технике — разработке микроэлектронных датчиков физических величин. Рассмотрены вопросы обеспечения стабильности датчиков как комплексная система обеспечения качества. Показана важность проблемы учета и компенсации влияния внутренних механических напряжений на сенсорные структуры.

Уникальные возможности в направлении резкого повышения ресурса, надежности и расширения функций предоставляются при внедрении достижений микромеханики в датчики нового поколения — микроэлектронные датчики (МЭД). Интеграция микромеханических конструкций чувствительных элементов со схемами обработки, усиления и согласования позволяет качественно улучшить характеристики МЭД. Так, в частности, используя эффект мультичувствительности полупроводниковых структур к различным физическим параметрам, можно реализовать совмещенные датчики, например, давления и температуры, давления и вибраций, газоанализаторы различных газов и т. д. [1—3].

В то же время, эксплуатация МЭД в различных отраслях и условиях показала их потенциальную уязвимость по отношению к таким воздействующим факторам (ВФ), как температура, ионизирующие излучения, механические воздействия, которые приводят к дрейфу характеристик и деградации самих датчиков.

Вопросы обеспечения стабильности датчиков всегда были одними из основных в измерительной технике и приборостроении. Особую актуальность они приобрели в связи с созданием и развитием сложных автономных

измерительных и управляющих систем в космонавтике, энергетике, трубопроводном транспорте, охране важных объектов, экологии. Это связано с такими факторами, как длительный период функционирования объектов, невозможность их обслуживания и ремонта, в том числе монтажа—демонтажа датчиков, территориальная отдаленность, скрытность и т. д. Показательными объектами указанных выше отраслей являются: охранные системы стратегических объектов; орбитальные комплексы; межпланетные станции; плотины гидроэлектростанций, ядерные реакторы, контейнерные автономные метеостанции, а также преобразователи контролируемых параметров процесса, поскольку все современные информационно-измерительные системы, построенные с применением микропроцессоров, контроллеров и компьютеров, имеют на низовом уровне (процесс, установка, изделие, агрегат) опять те же датчики. И если их характеристики будут нестабильны во времени, то никакими программно-аппаратными средствами невозможно обеспечить информативность измерений и регулируемость процесса. Все это приводит не только к финансовым потерям, но может послужить причиной экологических катастроф (неуправляемость ядерной реакци-

ей, аварии на нефте- и газопроводах, прорыв плотин гидроэлектростанций и т. д.). Повышение стабильности датчиков является сложнейшей комплексной задачей, включающей в себя: создание новых конструктивно-технологических решений, разработку новых технологий, методов и процедур контроля, испытаний, долговременного анализа отказов и дефектов датчиков в процессе эксплуатации и т. д. При этом приоритетным направлением является создание новых конструкций и технологий, так как совершенствование датчиков, использующих традиционные методы преобразования, конструкции и технологии, в большинстве своем исчерпало и не оправдало себя на практике.

Как показала практика, отдельные меры, направленные на улучшение частных характеристик датчиков, не приводят к улучшению стабильности и чаще всего ухудшают другие характеристики (массу, ремонтпригодность, надежность и др.). Поэтому для решения проблемы обеспечения стабильности датчиков необходим комплексный подход, включающий рассмотрение всего датчика как систему, которая на разных уровнях, начиная с низового (атом, домен, кристалл, зерно) и заканчивая верхним (нормирующий преобразователь) уровнем, охвачена обратными связями — постоянными и временными. Последние образуются при изготовлении элементов датчика, например, при термообработке, диффузии и т. д. (рис. 1). При этом обратные связи могут быть как постоянными (в виде обратных преобразователей), так и временными, появляющимися в процессе изготовления структур датчика и при проведении целенаправленных процессов стабили-

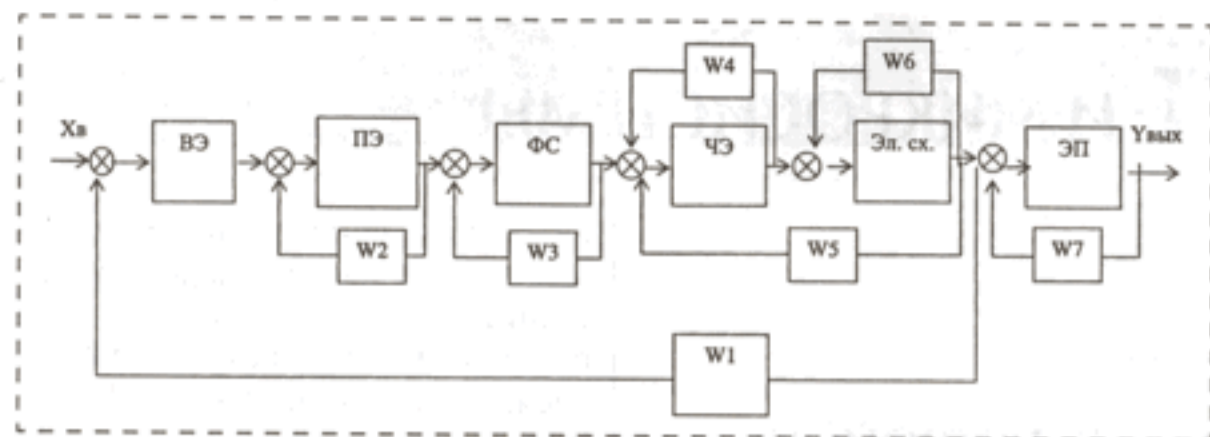


Рис. 1. Структурная схема стабилизированного МЭД:

ВЭ — воспринимающий элемент; ПЭ — передающий элемент; ФС — физическая среда; ЧЭ — чувствительный элемент; Эл. сх. — электрическая схема; ЭП — электронный преобразователь

зации (термотренировка, искусственное старение и др.).

Введение термостабилизации и контроля температуры чувствительного элемента МЭД, компенсации сдвига нуля и дрейфа чувствительности, минимизация термоупругих напряжений, защита от перегрузок и целый ряд других методов позволяют в значительной мере улучшить характеристики МЭД, а также измерительных и регулирующих систем на их основе.

В плане стратегии обеспечения стабильности МЭД необходимо решить целый ряд проблемных задач теоретического и прикладного характера (рис. 2).

Как видно из данной структурной схемы, задачу обеспечения стабильности можно условно разбить на следующие взаимосвязанные блоки:

- разработка вопросов теории стабилизации и управления сенсорных элементов (СЭ) и сенсорных систем (СС);

- разработка и исследование методов и средств стабилизации и регулирования электрофизических характеристик (ЭФХ);
- создание и оптимизация микромеханических конструкций, исследование их эффективности;
- разработка и исследование микромеханических технологий и операций;
- внедрение методов диагностики, ускоренных испытаний и технологических тренировок СЭ и СС;
- исследование параметрической устойчивости, живучести, восстанавливаемости МЭД, прогнозирование функционирования.

В качестве основополагающих составляющих начального, теоретического блока, отнесены следующие вопросы:

1. Анализ и оценка влияния ВВФ на устойчивость и стабильность СЭ и СС МЭД.

2. Стабилизация, авторегулирование СЭ и СС.
3. Управляемость ЭФХ СЭ и СС.
4. Разработка математических моделей.
5. Прогнозирование дрейфа параметров МЭД.
6. Выработка критериев стабильности.
7. Синтез обратных связей.

Как показала практика разработки и эксплуатации МЭД, значительное влияние на их метрологические и эксплуатационные характеристики оказывают внутренние механические напряжения в структурах чувствительных элементов (ЧЭ).

Это связано в первую очередь с тем, что большинство ЭФХ функциональных материалов МЭД зависит от деформации. В частности, для кремния такими характеристиками являются: пьезорезистивные коэффициенты, ширина запрещенной зоны, подвижность носителей, коэффициент перекрытия зон и ряд других. И если воздействие температуры в какой-то мере можно учесть, например, организовывая дополнительный информационный канал, служащий для введения корректирующих сигналов, термостабилизацией ЧЭ, схемной компенсацией и т. д., то с влиянием паразитных деформаций дело обстоит иначе. Дело в том, что для ЧЭ МЭД, основанных на пьезорезистивном и пьезоэлектрическом принципах преобразования, ме-



Рис. 2. Стратегия обеспечения стабильности сенсорных элементов и структур микроэлектронных датчиков:

1 — оценка влияния ВВФ на устойчивость и стабильность СЭ и СС МЭД; 2 — стабилизация, авторегулирование СЭ и СС; 3 — управляемость ЭФХ СЭ и СС; 4 — разработка математических моделей; 5 — прогнозирование дрейфа параметров МЭД; 6 — выработка критериев стабильности; 7 — синтез обратных связей

ханическая деформация является информативной величиной, которая преобразуется в изменение сопротивления СЭ или в заряд, т. е. каким-либо образом отфильтровать или учесть паразитную деформацию, действующую на ЧЭ, невозможно. Кроме того, наряду с указанными внешними деформационными факторами, в элементах и структурах МЭД всегда присутствуют внутренние механические напряжения, возникающие в элементах в процессе проведения технологических процессов и операций (особенно высокотемпературных). Так, в системах "полупроводник—изолирующая пленка", "металлизация—изолирующая пленка" и других в процессе проведения высокотемпературных обработок (термодиффузия, окисление, термовакуумная металлизация) после охлаждения возникают растягивающие или сжимающие напряжения, пропорциональные разнице в коэффициентах терморасширения (КТР) и температуре процесса формирования структуры.

Как правило, для интегральных схем и микроприборов, имеющих очень малое отношение толщины пленки к толщине подложки, указанные напряжения локализуются в пленке и в приповерхностном слое полупроводниковой подложки и мало влияют на характеристики приборов.

Влияние таких же напряжений на ЧЭ МЭД, имеющих малые толщины перемычек, мембран, упругих элементов, уже значительно существеннее, поэтому ими нельзя пренебрегать. Эти напряжения необходимо компенсировать, используя различные конструктивно-технологические методы, которые будут указаны ниже.

В информационно-энергетическом плане воздействия механических напряжений (МН) приводят к возникновению дополнительных нестационарных аддитивных и мультипликативных погрешностей, а также к усилению деградиационных эффектов, проявляющихся в процессе эксплуатации датчиков.

В частности, автору при разработке миниатюрных полупроводниковых датчиков акустических давлений пришлось вплотную столкнуться с необходимостью учета деформационных явлений в элементах ЧЭ и выработки конструктивно-технологических решений, уменьшающих до минимума влияние МН. Задачи минимизации МН оказались неординарными применительно к датчикам, малоизученными и решаемыми в большинстве случаев только эмпирически [4, 5].

Так как практически все элементы кристалла полупроводникового ЧЭ (ПЧЭ) под действием деформации в той или иной степени изменяют свои электрофизические характеристики, то естественно предположить, что внутренние напряжения оказывают влияние на большинство технических и эксплуатационных характеристик ПЧЭ и МЭД в целом, а также интегральных схем [6, 7]. Указанное влияние может проявляться различным образом:

- деформируются обратные ветви вольт-амперных характеристик (ВАХ) протяженных $p-n$ -переходов окружающих сенсорные элементы кристалла;
- увеличиваются токи утечки;
- снижаются пробивные напряжения;

- уменьшается тензочувствительность;
- увеличивается шумовая составляющая выходного сигнала;
- деформируются тонкие перемычки;
- наблюдается дрейф ЭФХ.

Таким образом, если не принять специальных мер конструктивно-технологического характера по уменьшению уровня МН, неинформативная составляющая выходного сигнала, обусловленная действием МН, может сравняться с информативной, что приведет в итоге к получению недостоверных результатов измерения. Кроме того, в некоторых случаях под действием МН происходит деградация и разрушение кристаллов МЭД.

На рис. 3 показан граф влияния структурных и температурных напряжений на основные характеристики СЭ и МЭД, из которого видно, что характер влияния на ЭФХ внутренних напряжений, порождаемых технологическими и конструктивными факторами, имеет сложный вид, так как в нем присутствуют разнообразные перекрестные связи.

В связи с дестабилизирующим характером влияния МН на МЭД рассмотрим некоторые методы компенсации их влияний (рис. 4).

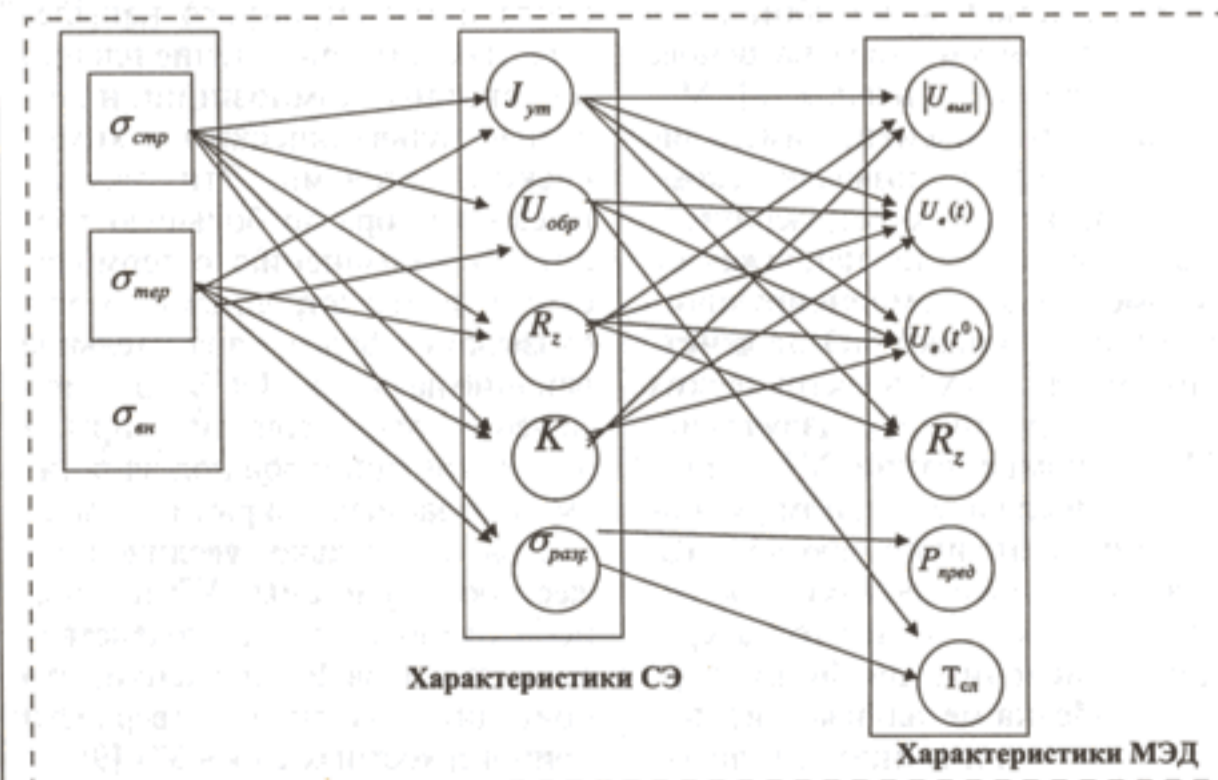


Рис. 3. Граф влияния внутренних напряжений на характеристики СЭ и МЭД

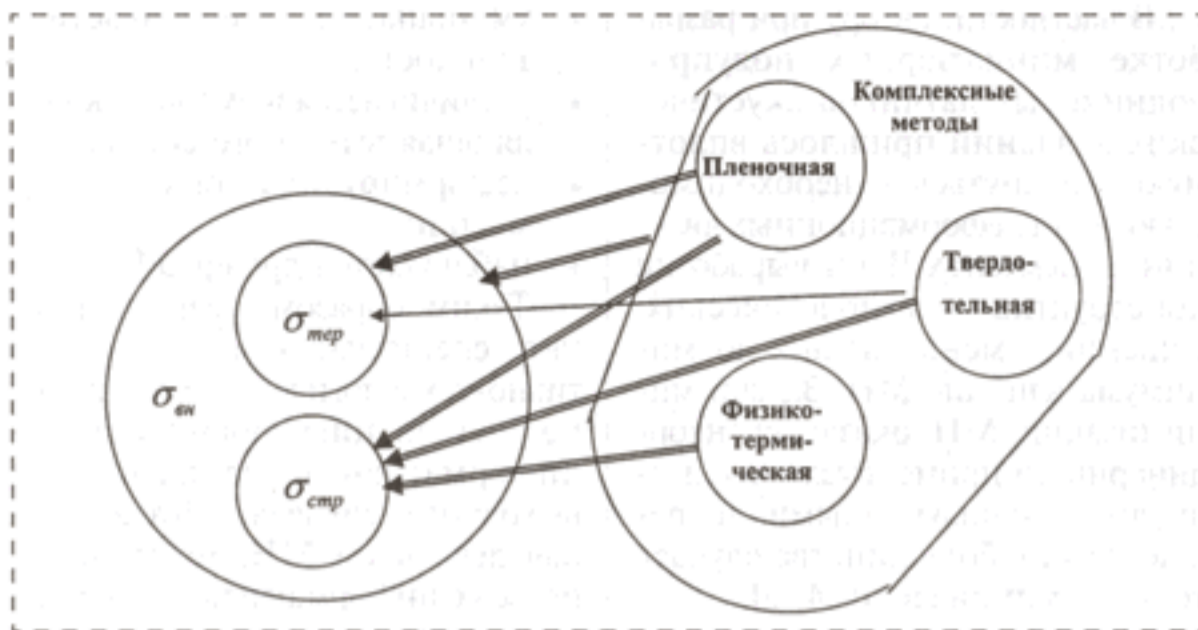


Рис. 4. Граф методов компенсации механических напряжений

Пленочная компенсация позволяет путем формирования на ЧЭ отдельных пленок или пленочных композиций минимизировать внутренние механические напряжения ($\sigma_{вн}$). Наиболее эффективен данный метод при компенсации термонапряжений. Пленки и пленочные композиции могут быть металлические, изоляционные, полупроводниковые и композиционные, а располагаться как локально, так и сплошным, перекрывающим активную область ЧЭ, слоем. При этом пленки, как правило, наряду с основными своими функциями — проводящими, изолирующими, экранирующими и другими, выполняют и роль компенсаторов $\sigma_{вн}$.

Эффективно уменьшить $\sigma_{вн}$ можно с помощью разработанного автором компенсатора на основе биметаллических пленок [8]. Металлические пленки, имеющие различный КТР, позволяют скомпенсировать как структурные, так и термические напряжения. Кроме того, компенсирующие пленки защищают ЧЭ от действия магнитных, электрических полей и различных излучений. Метод компенсации МН основан на последовательном уменьшении остаточного прогиба ЧЭ, возникающего в процессе проведения физико-термических операций (окисление, диффузия, термообработка металлизации), путем нанесения тонких и толстых металлических пленок, имеющих различные КТР.

В качестве металлических пленок на непланарную сторону ЧЭ наносились методом термического и магнетронного напыления пленки Al, Mo, Cr, Au толщиной 0,8...0,5 мкм, а также гальваническим методом осаждались пленки Cu, Ni, Sn—Vi толщиной 5...15 мкм. Варьируя толщиной, числом слоев и сочетанием пленок, можно добиться высокой степени компенсации в достаточно широком диапазоне температур. Наличие металлических пленок с достаточно малой, по сравнению с толщиной упругого элемента (УЭ), толщиной практически не снижает собственную резонансную частоту ЧЭ.

В ЧЭ наряду с пленками, формируемыми методами термического и магнетронного напыления, находят применение пленки и пленочные композиции, наносимые гальваническим и химическим методами. Эти пленки, имеющие гораздо большую толщину по сравнению с термическими и магнетронными, могут оказывать более значительное влияние на работу ЧЭ. Эффект изменения характеристик упругих элементов приборов под влиянием осаждаемых покрытий объясняется не только увеличением жесткости системы УЭ-пленки, но и химическим взаимодействием материалов УЭ и пленки, что приводит к изменению твердости приповерхностных слоев УЭ [9].

Для профилированных ЧЭ датчиков акустических давлений,

предназначенных для измерения малых давлений, заметное действие пленочных покрытий, осажденных гальваническими и химическими методами, проявляется уже при довольно малых соотношениях толщина пленки—перемычка (практически 1:20), поэтому указанные пленки могут быть использованы для компенсации значительных внутренних механических напряжений в ЧЭ.

Для ЧЭ на малые диапазоны в качестве экранных, защитных и контактных покрытий должны использоваться те, которые имеют уровень внутренних МН, близкий к нулю. Это такие покрытия, как Sn—Ni с содержанием Ni $\approx 35,5\%$; Cu—Cr—Ni (при оптимальных условиях осаждения имеют небольшие сжимающие напряжения), Cu—Sn (20% Sn) и ряд других. Регулирование МН в необходимую сторону может осуществляться или изменением технологических режимов (температура, плотность тока, время осаждения и др.), или изменением состава материалов электродов и электролита. При этом для получения минимальных МН желательно, чтобы межатомные расстояния осаждаемой пленки и подложки были близки по значению. Наглядным примером практического использования метода компенсации МН металлическими пленками служат многослойные компенсированные печатные платы на основе инвара, покрытого пленкой гальванической меди.

Как было отмечено выше, в ЧЭ в целях изоляции и защиты применяют различные диэлектрические пленки: SiO₂, Si₃N₄, Al₂O₃ и другие, формирование которых происходит при высоких температурах (от 300 °С при осаждении в реакторах пониженного давления до 1200 °С при окислении в диффузионных печах), поэтому в них возникают значительные термонапряжения (ТН), влияющие на характеристики ЧЭ. Так, для ЧЭ, рассчитанных на малые диапазоны, ТН приводят к выхлопам мембран, уменьшению

чувствительности и прочим дефектам.

Методы минимизации термонапряжений могут быть следующими:

1) формирование на планарной и непланарной сторонах кристалла ЧЭ пленок одинаковой толщины;

2) легирование пленок примесями — компенсаторами;

3) покрытие пленок боросиликатным (БСС) и фосфоросиликатным (ФСС) стеклами;

4) уменьшение числа высокотемпературных термических операций;

5) снижение температуры формирования изоляционных пленок (окисление при повышенных давлениях, осаждение пленок плаз-

мохимическими и химическими методами);

6) использование структур, согласованных по КТР (структуры кремний на кремнии);

7) формирование твердотельных компенсаторов, встроенных в ЧЭ МЭД.

Наиболее перспективными и эффективными являются методы 2, 3, 5 и 7. Данные методы используются в настоящее время при разработке новых перспективных МЭД давлений, параметров движения, газоанализаторов.

Список литературы

1. Михайлов П. Г., Белоусов Е. Ф. Микромеханика приборов // Новые промышленные технологии. 2000. Выпуск № 6. С. 18.

2. Современное состояние и принцип развития датчиков на основе технологии микроэлектроники // ПСА и СУ — обзорная информация ТС-6. 1987. Вып. 5.

3. Михайлов П. Г., Белоусов Е. Ф. Микроэлектронные датчики: Проектирование, изготовление, диагностика / Учебное пособие. Пенза: Изд. ПГУ. 2001.

4. А. с. 1431470 СССР. Тензометрический преобразователь и способ его изготовления / Михайлов П. Г., Козин С. А., Белозубов Е. М. и др.

5. А. с. 1527526 СССР. Полупроводниковый чувствительный элемент / Михайлов П. Г., Буланов В. И.

6. Полякова А. А. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1979.

7. Сергеев В. В. Напряжения и деформации в элементах микросхем. М.: Радио и связь, 1988.

8. А. с. 626374 СССР. Чувствительный элемент преобразователя незлектрических величин / Михайлов П. Г., Матвеев А. К., Богонин В. В.

9. Феликсон Е. И. Упругие элементы силоизмерительных приборов. М.: Машиностроение, 1977.

УДК 621.3.049.77

В. Д. Вернер, д-р техн. наук, проф.,
НПК "Технологический центр" МИЭТ,
П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф.,
МИРЭА,
И. А. Пурцхванидзе,
Минпромнауки РФ

ОРГАНИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ НАЦИОНАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ПРОГРАММ ПО МИКРОСИСТЕМАМ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Рассмотрены организационные принципы создания национальных научных исследовательских программ по новым направлениям техники (микро- и нанотехнологиям).

Анализ мирового опыта формирования национальных и региональных программ по новым научно-техническим направлениям (микросистемная техника и нанотехнология) свидетельствует о наличии некоторых обязательных организационных элементов. К ним прежде всего относятся:

- выявление и формирование потребностей общества в развитии новых научно-технических направлений, способных существенно повлиять на экономику, технику, производство, здраво-

охранение, экологию, образование, оборону и национальную безопасность;

- обобщение этих потребностей и их оценка в форме национальной программы или совокупности программ другого уровня;
- выбор способов реализации программы, включая масштабы и источники финансирования;
- создание системы управления и поддержки выполнения и эволюции программы. Система должна быть гибкой и открытой;
- последнее обеспечивается созданием информационной сети поддержки.

Наиболее ответственный первый этап начинается с накопления результатов фундаментальных или демонстрационно-прикладных исследований, чаще всего в академических (университетских) исследовательских центрах.

Умение своевременно увидеть в первых ростках перспективу для развития экономики или роста безопасности страны служит мощным стимулом расширения исследований по новому направлению. Например, интерес правительства США к работам в области микронных механизмов способствовал становлению тематики развития МЭМС [1]. Важно наличие в госструктурах организаций, способных на определенный риск для "вылавливания" эффективных идей. К числу таких организаций относится, например, Агентство перспективных исследований Министерства обороны США (DARPA), одним из пунктов стратегии которого являются

чувствительности и прочим дефектам.

Методы минимизации термонапряжений могут быть следующими:

1) формирование на планарной и непланарной сторонах кристалла ЧЭ пленок одинаковой толщины;

2) легирование пленок примесями — компенсаторами;

3) покрытие пленок боросиликатным (БСС) и фосфоросиликатным (ФСС) стеклами;

4) уменьшение числа высокотемпературных термических операций;

5) снижение температуры формирования изоляционных пленок (окисление при повышенных давлениях, осаждение пленок плаз-

мохимическими и химическими методами);

6) использование структур, согласованных по КТР (структуры кремний на кремнии);

7) формирование твердотельных компенсаторов, встроенных в ЧЭ МЭД.

Наиболее перспективными и эффективными являются методы 2, 3, 5 и 7. Данные методы используются в настоящее время при разработке новых перспективных МЭД давлений, параметров движения, газоанализаторов.

Список литературы

1. Михайлов П. Г., Белоусов Е. Ф. Микромеханика приборов // Новые промышленные технологии. 2000. Выпуск № 6. С. 18.

2. Современное состояние и принцип развития датчиков на основе технологии микроэлектроники // ПСА и СУ — обзорная информация ТС-6. 1987. Вып. 5.

3. Михайлов П. Г., Белоусов Е. Ф. Микроэлектронные датчики: Проектирование, изготовление, диагностика / Учебное пособие. Пенза: Изд. ПГУ. 2001.

4. А. с. 1431470 СССР. Тензометрический преобразователь и способ его изготовления / Михайлов П. Г., Козин С. А., Белозубов Е. М. и др.

5. А. с. 1527526 СССР. Полупроводниковый чувствительный элемент / Михайлов П. Г., Буланов В. И.

6. Полякова А. А. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1979.

7. Сергеев В. В. Напряжения и деформации в элементах микросхем. М.: Радио и связь, 1988.

8. А. с. 626374 СССР. Чувствительный элемент преобразователя незлектрических величин / Михайлов П. Г., Матвеев А. К., Богонин В. В.

9. Феликсон Е. И. Упругие элементы силоизмерительных приборов. М.: Машиностроение, 1977.

УДК 621.3.049.77

В. Д. Вернер, д-р техн. наук, проф.,
НПК "Технологический центр" МИЭТ,
П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф.,
МИРЭА,
И. А. Пурцхванидзе,
Минпромнауки РФ

ОРГАНИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ НАЦИОНАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ПРОГРАММ ПО МИКРОСИСТЕМАМ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Рассмотрены организационные принципы создания национальных научных исследовательских программ по новым направлениям техники (микро- и нанотехнологиям).

Анализ мирового опыта формирования национальных и региональных программ по новым научно-техническим направлениям (микросистемная техника и нанотехнология) свидетельствует о наличии некоторых обязательных организационных элементов. К ним прежде всего относятся:

- выявление и формирование потребностей общества в развитии новых научно-технических направлений, способных существенно повлиять на экономику, технику, производство, здраво-

охранение, экологию, образование, оборону и национальную безопасность;

- обобщение этих потребностей и их оценка в форме национальной программы или совокупности программ другого уровня;
- выбор способов реализации программы, включая масштабы и источники финансирования;
- создание системы управления и поддержки выполнения и эволюции программы. Система должна быть гибкой и открытой;
- последнее обеспечивается созданием информационной сети поддержки.

Наиболее ответственный первый этап начинается с накопления результатов фундаментальных или демонстрационно-прикладных исследований, чаще всего в академических (университетских) исследовательских центрах.

Умение своевременно увидеть в первых ростках перспективу для развития экономики или роста безопасности страны служит мощным стимулом расширения исследований по новому направлению. Например, интерес правительства США к работам в области микронных механизмов способствовал становлению тематики развития МЭМС [1]. Важно наличие в госструктурах организаций, способных на определенный риск для "вылавливания" эффективных идей. К числу таких организаций относится, например, Агентство перспективных исследований Министерства обороны США (DARPA), одним из пунктов стратегии которого являются

№ по пор.	Продукт	Исследования	Развитие продукта	Снижение цены	Полная коммерциализация
1	Датчики давления	1954—1960 гг.	1960—1975 гг.	1975—1990 гг.	1990 г.
2	Акселерометры	1974—1985 гг.	1985—1990 гг.	1990—1998 гг.	1998 г.
3	Газовые сенсоры	1986—1994 гг.	1994—1998 гг.	1998—2005 гг.	2005 г.
4	Клапаны	1980—1988 гг.	1988—1996 гг.	1996—2002 гг.	2002 г.
5	Сопла	1972—1984 гг.	1984—1990 гг.	1990—2002 гг.	2002 г.
6	Фотоника/дисплей	1980—1986 гг.	1986—1998 гг.	1998—2004 гг.	2004 г.
7	Биохимические сенсоры	1980—1994 гг.	1994—2000 гг.	2000—2004 гг.	2004 г.
8	Радиочастотные компоненты	1994—1998 гг.	1998—2001 гг.	2001—2005 гг.	2005 г.
9	Датчики уровня	1982—1990 гг.	1990—1996 гг.	1996—2002 гг.	2002 г.
10	Микрореле	1977—1982 гг.	1993—1998 гг.	1998—2002 гг.	2002 г.

инвестиции в высокорисковые, высокоэффективные (High-focus) проекты.

Расширение числа участников и тем исследований позволяет на определенном этапе сформировать и официализировать государственную (национальную) программу.

Почему нужна государственная финансовая поддержка на первом этапе? Дело в том, что выход разработки на рынок требует 5—10 лет (см. таблицу). Если государство заинтересовано в быстрейшем развитии направления, оно должно взять на себя бремя первоначальных расходов на исследования и формирование инноваций. Чем шире фронт работ, тем более вероятен возврат средств за счет налогообложения производства и/или продаж нового продукта.

В зависимости от традиций развития национальной экономики, ее финансовой мощи и целей формируется содержание программы, методы ее финансирования и формы реализации. Не последнюю роль играют государственные амбиции. Южная Корея, например, увидела в микросистемной технологии способ войти в семерку стран высоких технологий (G7-проект) [2]. Еще в большей мере это проявилось в "Национальной наноинициативе" (NNI) США. Считая нанотехнологию основой новой индустриальной революции, правительство США в 2 раза увеличило финансирование наноисследований и нанотехнологии с целью занять и закрепить лидирующее (первое) место в мире в ближайшие пять лет [3].

Однако никакие амбиции не приведут к результату без организационной основы их реализации в форме создания национальной системы управления и поддержки выполнения программы. Отдельные элементы этой системы направлены на реализацию различных этапов программы. Весьма схематично элементы системы отражены на рис. 1. Мы не ставим задачу детального анализа выбора и обоснования каждого элемента системы, отметим только, что в зависимости от уровня развития национальной программы меняются доля и число указанных элементов. В качестве иллюстрации на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки) приведена схема европейской сети поддержки Minanet. Важ-

но еще раз отметить, что без организации национальной программы и сопровождающей ее четкой системы управления и поддержки невозможно освоение новой научно-технологической области. Важность развития инфраструктуры поддержки подчеркнута в NNI [3]. Авторы [4] считают, что с 2001 г. наблюдается четкая тенденция роста инвестиций в сфере микросистемной техники именно в инфраструктуру. В частности, увеличивается, например, не только число центров заказного производства (foundry) на базе кремниевой технологии (рис. 3, см. четвертую сторону обложки) [4]), но и обновляется их производственная база. Если три года назад большинство заводов использовали подложки диаметром 100 мм, то в 2002 г. основная часть заводов использует пластины диаметром 150 мм.

Таким образом, развитие нового научно-технического направления микросистемной техники требует системного подхода со стороны всех участников процесса развития. Этими участниками являются органы государственного управления, организации (НИИ, университеты, большие и малые предприятия, ассоциации и т. д.), исследовательские группы и группы разработчиков, специалисты.

Иерархия взаимодействия между участниками в области MCT реализуется с помощью соответствующих организационных структур (уровней).

Первый уровень — **национальные программы**. Задача программы — определить вектор развития MCT в стране. Как правило, программа становится частью научно-технической и экономической политики страны. В связи с этим она отражает основные черты этой политики в своих задачах, темпах развития MCT, наборе участников программы. Естественно, что задачи должны быть сбалансированы по уровню финансовых возможностей поддержки программы со стороны правительства и других источников финансирования.

По материалам NEXUS за 1998—2000 гг. можно сделать заключение [5], что у трех региональных лидеров (Северная Америка — США и Канада, Япония и Западная Европа) ежегодный объем финансирования развития MCT составляет несколько сотен миллионов долларов. Китай, Тайвань и Южная Корея, не имея детально разработанных

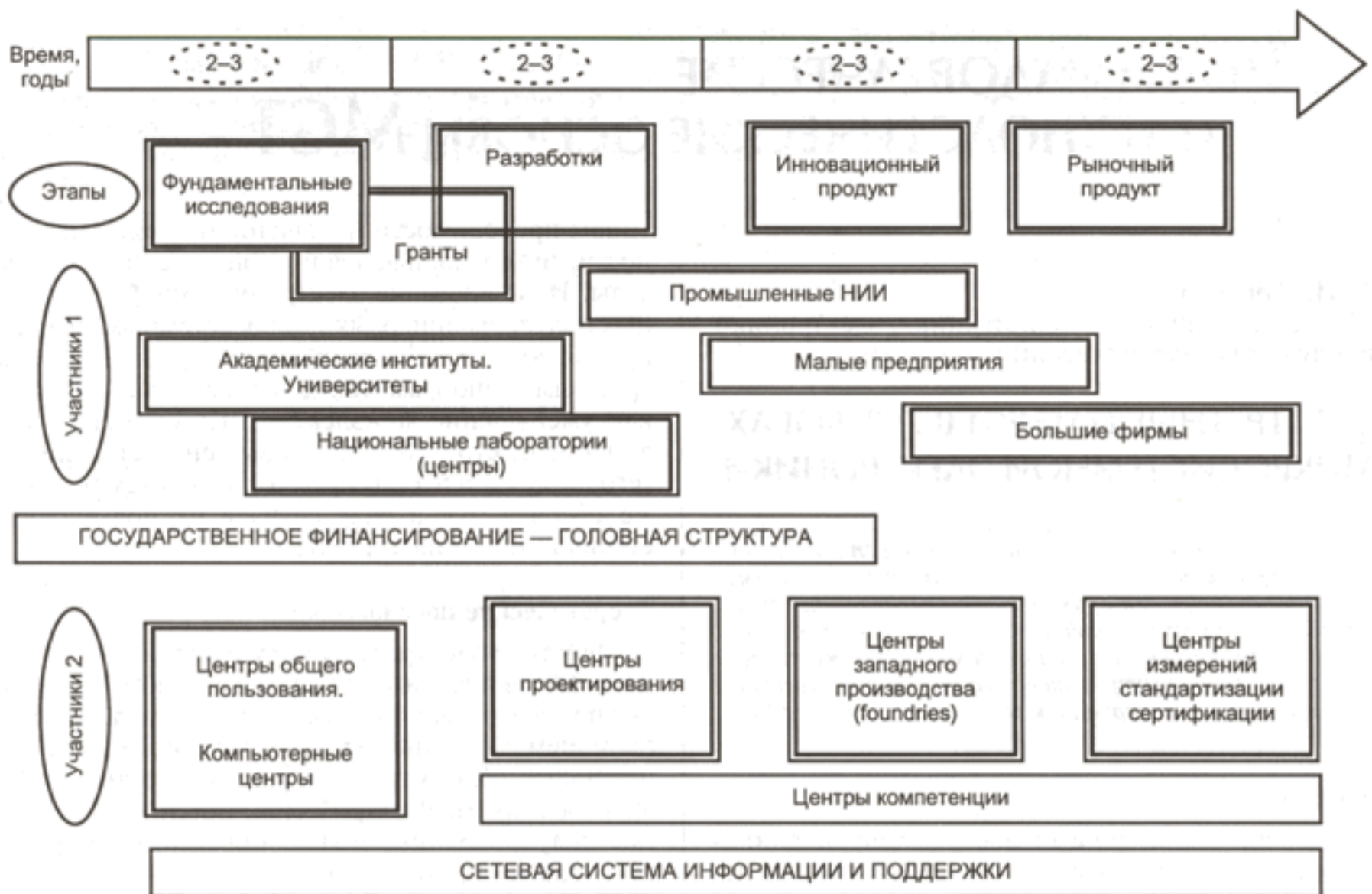


Рис. 1. Элементы национальной системы управления и поддержки выполнения программы

национальных программ, четко определили место МСТ в развитии национальной экономики. Страны Центральной и Восточной Европы пока демонстрируют только зачатки деятельности в области микросистемной техники, но они входят в состав новых ассоциативных государств (NAS — newly associated States) Евросоюза: Болгария, Кипр, Чехия, Эстония, Венгрия, Литва, Польша, Румыния, Словакия, Словения и Мальта. В связи с этим обстоятельством они включены в новую европейскую программу исследований и технологического развития (FP5) и становятся участниками программы IST (User-friendly Information Society), по которой ведется финансирование работ по МСТ. Страны СНГ пока далеки от возможности сформировать какие-либо национальные программы МСТ.

Второй уровень консолидации усилий по развитию МСТ — создание ассоциаций, содействующих развитию МСТ в стране. Положение с развитием таких структур в мире полностью соответствует уровню национальных программ. Чем выше уровень национальной программы, тем больше ассоциаций и тем шире круг их участников.

Третий уровень — межфирменные соглашения по развитию группы изделий МСТ. Они получили распространение в "МСТ развитых" странах и носят как национальный, так и международный характер.

Четвертый уровень — эффективность реализации задач организационных структур. Этот уровень во многом определяется уровнем развития сети поддержки и информации на базе Интернета.

В России имеется опыт создания национальных программ различного уровня. Самыми известными из них стали атомные и космические проекты. Микросистемная техника формально отнесена к приоритетным научно-техническим направлениям. Фрагменты МСТ внесены в ряд подпрограмм ФНТЦП, но национальная программа МСТ, сопоставимая по организационному (не говоря уже о финансовом) уровню с ведущими национальными программами других стран, отсутствует. Какими бы рамками по задачам и финансированию не была ограничена национальная программа МСТ, она должна быть концептуально определенной и поддерживаемой соответствующими структурами.

Список литературы

1. Стик Г. Микронные механизмы // В мире науки. 1993. № 1. С. 69—78.
2. Highly Advanced National Programme (HAN — "G — 7 Programme") / Asian MEMS update Semicon conference, 1998.
3. National nanotechnology Initiative. Jule 2000. Washington D. C.
4. Van Heeren H., Elders I. Foundries for MEMS/MST: a status overview 2001/2002 // MST news. 2002, N 2/02. С. 41—43.
5. NEXUS. www.nexus-mems.com.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 621.319.2

А. П. Лучников,
Московский институт радиотехники, электроники
и автоматики (технический университет)

ЭЛЕКТРЕТНЫЕ ПЛЕНКИ В ПРИБОРАХ МИКРОСИСТЕМНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Описаны физические принципы перспективных функциональных устройств с электретным слоем, предназначенных для применения в полупроводниковых приборах микросистемной электроники. Даны рекомендации по их применению в датчиках, акустических преобразователях, полупроводниковых приборах и быстродействующих фотоприемниках.

Введение

Эффективность и надежность полупроводниковых приборов и интегральных схем определяет надежность и качество электронной аппаратуры в целом. Использование электретов позволяет создавать полупроводниковые лазеры и фотоприемники, транзисторы, электронные ключи и другие приборы с улучшенными характеристиками, расширенными функциями и тем самым совершенствовать электронную аппаратуру. Применение электретных пленочных элементов в бесконтактных коммутаторах систем ввода информации существенно повышает надежность устройства ввода за счет устранения недостатков, которые присущи контактному элементу коммутации [1]. Использование электретов в микрофонах и приемниках систем визуализации акустических голограмм [2–4] позволило значительно упростить систему антенной решетки и повысить чувствительность в широком диапазоне частот, а в фотоприемнике пикосекундного диапазона существенно увеличить быстродействие и улучшить качество преобразования оптической информации [5–7].

Электретные пленки функционально и технологически согласуются с приборами полупроводниковой электроники. В последние годы получены тонкие пленочные электретные материалы на основе оксида кремния и фторполимеров, которые обеспечивают высокие электретные характеристики и технологически совместимы с полупроводниковыми приборами и элементами функциональной электроники [8–14]. Применение электретов позволяет простыми и недорогими способами создавать в полупроводниках области с определенным

типом проводимости и значением электропроводности, инверсионные слои и физические $p-n$ переходы. Использование электретов в микроэлектронных полупроводниковых микросистемных приборах привлекательно возможностью придавать электронным приборам такие уникальные свойства, как уменьшение межэлектродных емкостей, увеличение быстродействия, повышение степени интеграции элементов в интегральных схемах, а также обеспечение в ряде случаев их повышенную стабильность и надежность.

Теоретические предпосылки

Действие электрета на полупроводник обусловлено электрическим полем, источником которого являются заряды в электретном материале, а также наличием локальных электронных состояний, возникающих вблизи границы раздела электрета с полупроводником. Электрический потенциал ϕ в объеме полупроводника можно определить из решения уравнения Пуассона:

$$d^2\phi/dx^2 = -4\pi\rho/\epsilon\epsilon_0, \quad (1)$$

где объемный заряд в полупроводнике

$$\rho(x) = e[N_d - N_a + p - n], \quad (2)$$

e — заряд электрона; N_d и N_a — концентрации ионизированных доноров и акцепторов; p и n — концентрации свободных дырок и электронов в слое, отстоящем на x от границы раздела между полупроводником и электретом; ϵ — диэлектрическая проницаемость; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. При этом верны следующие граничные условия:

$$\phi|_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad d\phi/dx|_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad \phi|_{x=0} = \phi_s. \quad (3)$$

Напряженность электрического поля на границе раздела E_s направлено по нормали к этой границе и связано с приведенным к единичной площади зарядом электрета Q_s :

$$\epsilon\epsilon_0 E_s = 4\pi Q_s. \quad (4)$$

Величины Q_s и ϕ_s в легированном полупроводнике взаимно связаны соотношением

$$Q_s = 2n_i e L_D \{ \gamma [\exp(e\phi_s/(kT)) - 1] + \gamma^{-1} [\exp(-e\phi_s/(kT)) - 1] + (e\phi_s/(kT))(\gamma^{-1} - \gamma) \}^{1/2}, \quad (5)$$

где L_D — длина экранирования Дебая; n_i — собственная концентрация; $\gamma = (n/n_i) = (n_i/p)$; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

В легированном невырожденном полупроводнике n -типа ($n/n_i \gg 1$ и $[e\phi_s/(kT)] \gg 1$, поэтому соотношение (5) упрощается:

$$Q_s \approx [\epsilon\epsilon_0 nkT/(2\pi)]^{1/2} \exp[e\phi_s/(2kT)]. \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что электретный слой с поверхностной плотностью заряда Q_s создает в полупроводнике поверхностный потенциал ϕ_s , а электрическое поле проникает в объем полупроводника на глубину L_D , которая определяет размер области пространственного заряда (ОПЗ).

В зависимости от значения и знака Q_s в полупроводнике возникает обогащенный, обедненный или инверсионный приповерхностный слой и физический p - n -переход, что можно использовать для управления параметрами и свойствами полупроводниковых материалов в приборах с помощью электретов.

Электретные пленки

В настоящее время высокостабильные электретные элементы микроприборов практически можно создавать с высокой плотностью поверхностного заряда в виде пленок и покрытий из фторполимерных материалов [8–10], а также на основе пленок или слоистых структур из оксида и нитрида кремния [12–14]. Оксид кремния является наиболее термостабильным электретом, в котором величина Q_s в слое толщиной до 0,4 мкм может достигать 10^{-6} Кл/см² и создавать поверхностные поля с напряженностью более 10^6 В/см. Сильное электрическое поле электрета влияет не только на полупроводниковую подложку, но также изменяет свойства самого электретного материала. Так, по данным эллипсометрических измерений коэффициент оптического преломления оксида кремния на длине волны 0,63 мкм изменяется в среднем на $6 \cdot 10^{-2}$, что необходимо учитывать при его использовании в оптоэлектронных приборах.

На рис. 1 приведена принципиальная схема электронного ключа, содержащего полупроводниковый прибор, идентичный полевому транзистору. В полупроводниковой подложке 1 имеются два электрода 2 и 3 с выводами, разделенными зазором 1, отличающиеся от подложки типом проводимости.

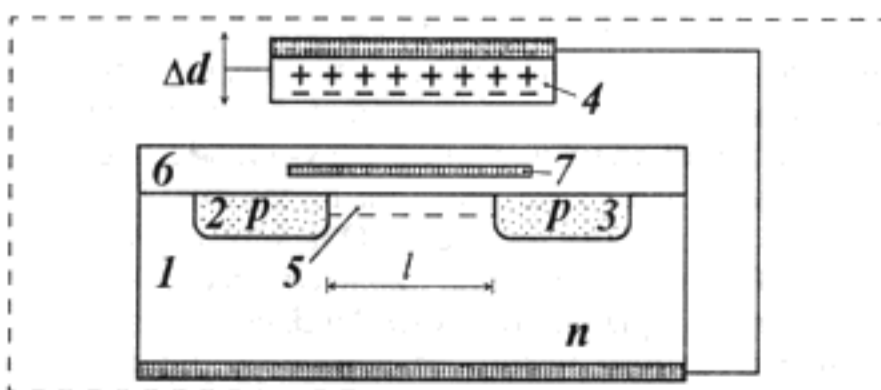


Рис. 1

В устройстве имеется электретный элемент 4, знак заряда которого совпадает со знаком заряда основных носителей в подложке. Электрет 4 находится на расстоянии d от изолятора 6 полевого транзистора и может перемещаться на расстояние Δd . Изменяя Δd , можно включать или выключать электрический ток между электродами 2 и 3 под диэлектрическим слоем 6 (благодаря эффекту поля в зоне 5) при любой полярности подводимого к электродам внешнего напряжения. Применение дополнительного изолированного электрода 7, размещенного в защитном слое диэлектрика 6, повышает чувствительность и стабильность параметров выходного импульса прибора. Такой микроприбор может использоваться в качестве бесконтактного электронного ключа многоцелевого назначения, который лишен недостатков, присущих контактными переключателям.

Наиболее эффективное использование электретные элементы нашли в миниатюрных конденсаторных микрофонах для приема акустических звуковых или ультразвуковых сигналов в газовой среде [4, 14]. Принципиальная схема конструкции электретного микрофона представлена на рис. 2 [14]. Здесь динамический конденсатор микрофона создается кремниевым противоэлектродом 1 и эластичной мембраной 2, которая выполнена из полимера, металлизированного с внешней стороны алюминием. Кремниевый противоэлектрод 1 имеет электретный слой 3 из оксида кремния и сквозное отверстие 4, соединяющее воздушный объем в зазоре динамического конденсатора с объемом акустической камеры 5. На обратной стороне кремниевого противоэлектрода 1 имеется согласующий усилитель 6 на полевом транзисторе, выполненный по интегральной технологии. Корпус акустической камеры 7 может изготавливаться как из кремния, так и из другого конструкционного материала. При выполнении мембраны 2 из полиэтилентерефталата (толщиной 13 мкм) частотная характеристика микрофона (кривая 1 на рис. 3) имеет резонанс на частоте 8,5 кГц, что обеспечивает прием звуковых сигналов до 10 кГц с чувствительностью 8,8 мВ/Па. Однако описанная конструкция микрофона не обеспечивает субминиатюрность его размеров, поскольку применяемый

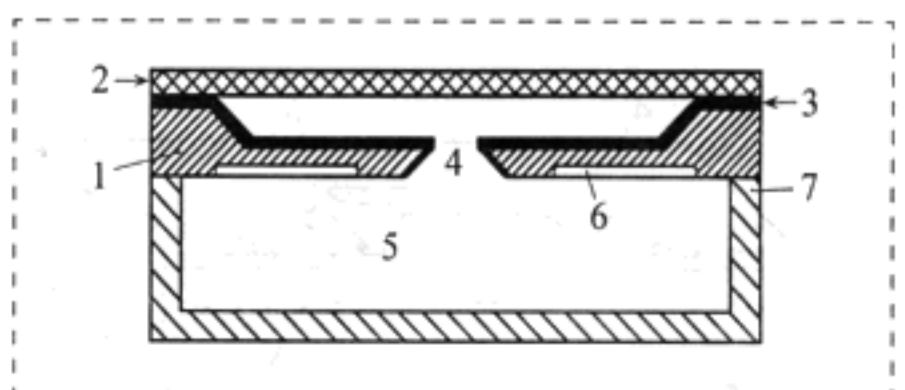


Рис. 2

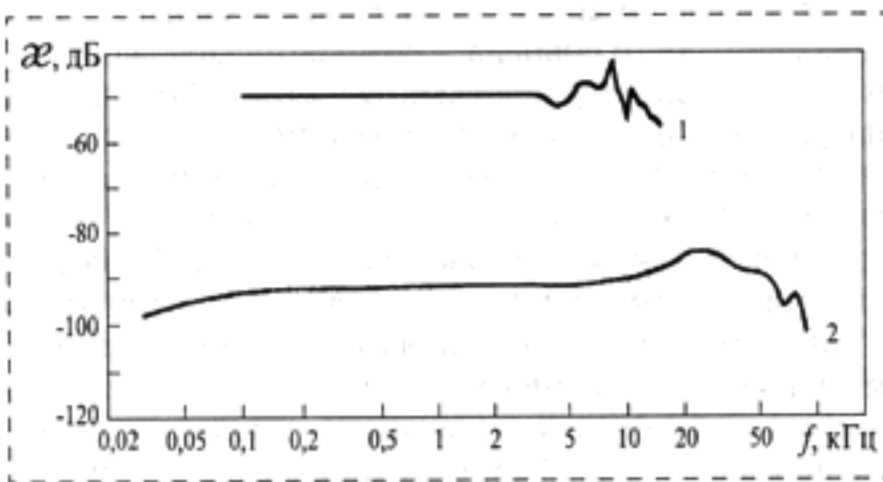


Рис. 3

тип отдельных мембран усложняет конструкцию и технологию его выполнения. Исследования [4, 14, 15] показали, что миниатюризация микрофонов возможна при изготовлении всех элементов его конструкции по кремниевой интегральной технологии, используемой в микроэлектронике. Здесь мембрана может быть выполнена на кремнии в виде слоистой структуры из оксида и нитрида кремния с металлизацией алюминием (как электродом) при общей толщине, не превышающей 1 мкм. В этом случае габаритные размеры основной конструкции динамического конденсаторного преобразователя могут не превышать $\sim 2 \times 2$ мм.

В конструкции субминиатюрного микрофона из кремния (рис. 4) [4] мембрана выполнена в виде активной слоистой структуры 2—3 из оксида кремния 2 и нитрида алюминия 3 на кремнии 1 и обладает высокими пьезоэлектрическими свойствами. Электроды 4 и 5 выполняются планарными и наносятся вакуумным напылением алюминия на поверхность. При общей толщине мембраны, не превышающей 1 мкм, в акустическом преобразователе обеспечивается хорошая чувствительность в широком диапазоне частот акустических колебаний (кривая 2 на рис. 3) в газовой среде. Преобразователь конструктивно прост и имеет минимальные габаритные размеры $1,7 \times 1,7$ мм.

Для регистрации ультразвука в жидких средах в электретном преобразователе используется упругий электретный элемент 4 (рис. 5) [16]. Принцип построения датчика аналогичен рассмотренному выше (см. рис. 1). Такой датчик преобразует акустическое давление в жидкой среде в электриче-

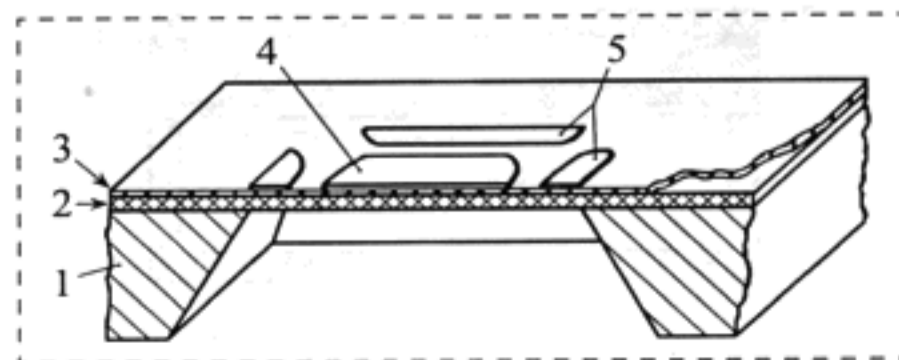


Рис. 4

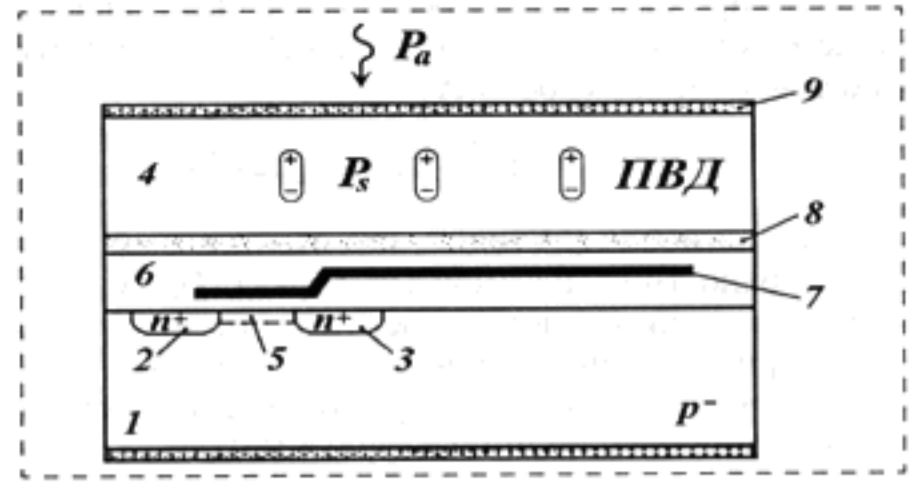


Рис. 5

ский сигнал. В устройстве, представленном на рис. 5, вместо воздушного зазора используется полимерный электретный материал поливинилфторид (ПВФ) толщиной 30 мкм, который после термополяризации имеет устойчивую остаточную поляризацию (электретное состояние) P_s . При этом электрет из ПВФ обладает высокими пьезоэлектрическими свойствами. В таком преобразователе внешнее акустическое давление P_a жидкой среды вызывает изменение наведенного заряда на электроде 7 за счет пьезоэффекта в поляризованном ПВФ, благодаря чему полупроводниковый транзисторный элемент в кремнии 1 преобразует его в изменение тока между электродами 2 и 3 пропорционально амплитуде акустического давления. Здесь электрод 7 расположен внутри защитного диэлектрического слоя 6 (из оксида кремния толщиной 1,5 мкм) и выполнен с размерами, большими, чем чувствительная область 5 полевого транзистора 2—5—3, что повышает чувствительность преобразователя. Слой эпоксидной смолы 8 (толщиной не более 5 мкм) является клеевым. Электроды 1 и 9 заземлены. Конструктивно микроприбор изготовлен в виде линейки-антенны из 34 электретных элементов на полупроводниковом кристалле размером $9 \times 14,28$ мм для сканирования акустических полей в диапазоне частот от 1 до 6 МГц. Каждый элемент линейки-антенны выполнен согласно схеме, показанной на рис. 4, и имеет размер $0,42 \times 9$ мм [16].

В перспективе можно использовать электретный эффект в слоистых активных полупроводниковых структурах, например, в типовом полевом транзисторе с изолированным затвором, где возможно существенно снизить его межэлектродную емкость сток—исток и повысить быстродействие. Схема такой транзисторной структуры с электродами истока и стока 2 и 3 на подложке 1 с электретом 6 показана на рис. 6. Обычно электрод затвора 4, размещенный на диэлектрическом слое 5, частично покрывает области 2 и 3, создавая значительную емкость исток—затвор—сток. Если же затвор сделать короче канала транзистора и ввести электретное покрытие 6, то уменьшится межэлек-

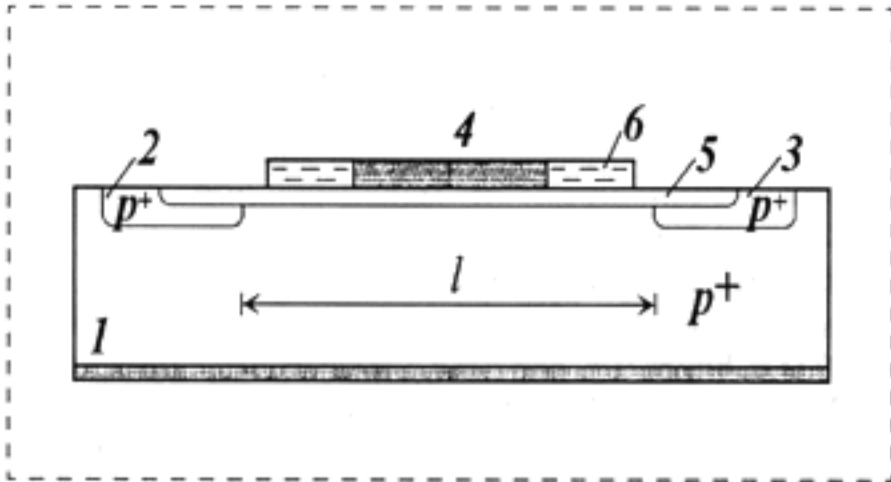


Рис. 6

тродная емкость, а проводимость канала исток—сток не ухудшится из-за образования инверсионных областей у краев электрода затвора. Таким образом, использование электретного пленочного покрытия с достаточной плотностью заряда Q_s определенного знака уменьшит межэлектродные емкости полевого транзистора и обеспечит повышение быстродействия прибора.

Высоковольтные диоды и транзисторы обычно имеют систему делительных охранных колец, обеспечивающих увеличение напряжения пробоя, которые обычно создают методом диффузии примесей. Замена или совмещение с ними индуцированных электретных колец позволит сократить периметр высоковольтных приборов и тем самым увеличить выход годных приборов при их размещении с повышенной плотностью. Структура такого диода изображена на рис. 7, где на кремниевой n-подложке 1 имеется область 2 p-типа проводимости и металлический электрод 6. На поверхности подложки сформированы электретные слои 4, которые защищены диэлектрическим слоем 5. Благодаря электретным элементам 4 толщина ОПЗ вдоль поверхности раздела диэлектрик—полупроводник больше ее толщины в объеме подложки, чем обеспечивается желаемое увеличение напряжения поверхностного пробоя. Электрет 5 может быть нанесен как дискретными кольцами, так и непрерывным покрытием с изменяющейся по площади плотностью заряда, чтобы обеспечить высокую однородность электрического поля вдоль поверхности прибора и соответственно повысить напряжение пробоя.

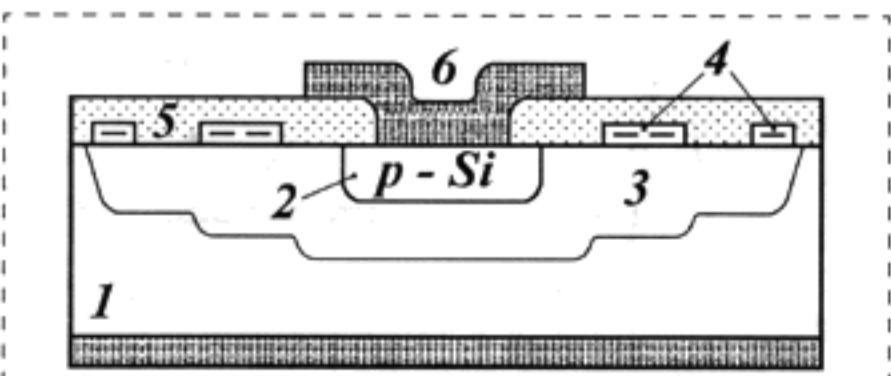


Рис. 7

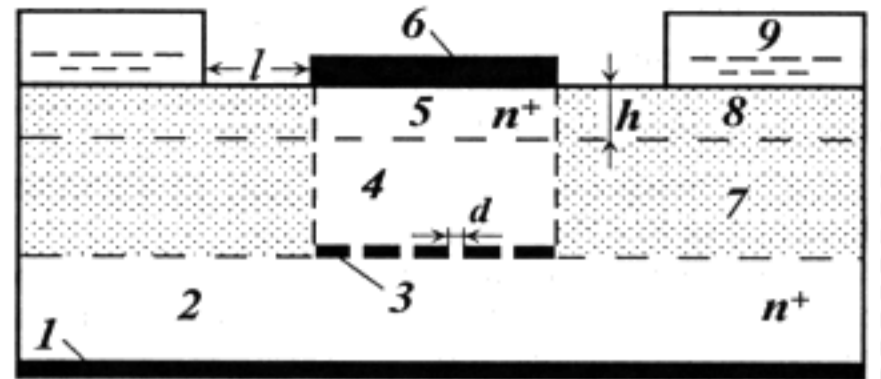


Рис. 8

Полевой транзистор с проникаемой базой [17] относится к транзисторам нового типа, обладает высоким быстродействием, а отдельные его разновидности обеспечивают более расширенную функциональную зависимость между входным сигналом и выходным током, чем в других приборах [18]. Схема такого транзистора изображена на рис. 8. Прибор формируется на подложке 2 (например, из арсенида галлия n⁺-типа проводимости) с электродом 3, на котором расположен высокоомный слой 4, например, из арсенида галлия n-типа проводимости. В приповерхностной части слоя 4 расположена область 5 n⁺-типа проводимости также из арсенида галлия толщиной h с электродом 6. Металлический затвор 3 и слой 4 образуют барьер Шоттки. Затвор 3 состоит из системы металлических полос, отстоящих друг от друга на расстоянии d, причем $d \ll 2L_D$, где L_D — толщина ОПЗ у контакта Шоттки. Структура транзистора ограничена с боков областями 7 и 8 из компенсированного полупроводящего арсенида галлия n-типа проводимости. Эти области должны быть достаточно высокоомными, чтобы ограничивать ток между стоковым 3 и истоковым 6 электродами за пределами проникаемой базы. Для обеспечения изолирующих свойств в областях 7 и 8 обычно создаются радиационные дефекты протонной бомбардировкой.

Скопление радиационных дефектов, возникающее в этом случае, способствует проводимости и образованию проводящих кластеров и каналов в этих областях, что приводит к повышению уровня собственных шумов и ухудшению характеристик микроприбора. Улучшить и стабилизировать параметры такого прибора возможно путем улучшения изолирующих свойств областей, ограничивающих с боков транзисторную структуру, применением электретного покрытия. Здесь изолирующие слои можно создать также с помощью электретных пленочных элементов 9, расположенных на поверхности истокового слоя 8 в виде ОПЗ с высокими и стабильными изолирующими свойствами. Знак заряда электрета должен совпадать со знаком основных носителей заряда в полупроводнике 7, 8. Так, для случая сильно легированного

полупроводника ($n/n_i \gg 1$) решение уравнения Пуассона (1) позволяет получить критерий выбора плотности заряда Q_s в виде соотношения

$$Q_s \geq [\epsilon \epsilon_0 k T N / (2\pi)]^{1/2} \exp \varphi_s, \quad (7)$$

где φ_s — поверхностный потенциал, измеренный в единицах kT .

Наименьшее расстояние l от края электретного слоя до истокового электрода можно определить из следующего соотношения:

$$[8 \ln(N/n_i) / \varphi_s]^{1/2} \leq l / L_D. \quad (8)$$

В приборе на основе арсенида галлия при максимальном искривлении зон у поверхности ($\varphi_s = 28$) с концентрацией в n^+ -слое $N = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ величина $h < 10^{-6} \text{ см}$. При $N = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ величина $h < 10^{-5} \text{ см}$. При этом концентрация дефектов в изолирующих областях 7 и 8 не должна превышать $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, соотношения (7), (8) представляют критерий создания ОПЗ в полупроводнике для обеспечения улучшенных параметров транзистора с проницаемой базой.

Электретные покрытия используются в быстродействующих фотоприемниках, работающих в пикосекундном диапазоне [6, 7]. Современные фотоприемники, работающие в ближней ИК области спектра с длительностью импульса фотоответа 100–150 пс, достаточно полно описаны в работе [19], а УФ фотоприемники рассмотрены в работе [20]. Перспективными являются фотоприемники с двумя планарными контактами из золота, образующими потенциальные барьеры Шоттки с полупроводником. Использование электрета в таких фотоприемниках позволяет улучшить их быстродействие. Структура фотоприемника изображена на рис. 9, а, где в плоскости полупроводниковой подложки 1 расположены два прямоугольных электрода 2 и 3 размером $a \times l$, которые образуют с подложкой 1 из арсенида галлия контакты с барьером Шоттки. Открытая поверхность полупроводника или d -зазор между электродами являются приемным окном светового излучения. Быстродействие такого прибора определяется временем пролета носителей зарядов между электродами 2 и 3. Для оценки связи быстродействия прибора с его конструктивными параметрами выполнен расчет фронта импульса фототока. Использован метод конформных преобразований на основе аналогии между емкостью и проводимостью в однородной среде без воздействия электретного слоя. Однородность электрических свойств полупроводника обеспечивается тем, что расстояние d выбирается значительно меньше толщины ОПЗ барьера у контактов Шоттки. Исследования показывают, что основной вклад в ток фотоотклика вносят участки электродов, отстоящие от зазора между электродами не более, чем на d . Именно в этой части полупроводника обеспечивается однородность его электрических

свойств. Здесь межэлектродный зазор d и время пролета носителей в нем определяют быстродействие фотоприемника, которое зависит от трех факторов: краевых эффектов вблизи электродов, дрейфовой подвижности и максимальной скорости дрейфа носителей зарядов.

Вопрос о подвижности носителей зарядов в фотоприемнике со встречно включенными барьерами Шоттки является важным, так как она радикальным образом влияет на его быстродействие. В высокоомных полупроводниках с проводимостью, близкой к собственной, подвижность снижается, как, например, в i -области планарных $p-i-n$ фотодиодов [16]. Недостаток, присущий $p-i-n$ диодам, частично проявляется у фотоприемников на барьерах Шоттки, изготовленных из высокоомных полупроводников, когда в межэлектродном зазоре проводимость приближается к собственной.

Однако, если реализовать пространственное разделение электронов и дырок в полупроводниковом кристалле вблизи электродов 2 и 3 (рис. 9, б), например, дополнительным внешним электрическим полем (полем электрета), то можно обеспечить усиление монополярного типа проводимости в межэлектродном зазоре, увеличение скорости дрейфа фотоносителей и соответственно повышение быстродействия фотоприемника. При этом устраняется влияние краевых эффектов на затягивание заднего фронта фототока, чем обеспечивается увеличение быстродействия. В фотоприемнике (рис. 9, а, б) с электретным покрытием 5 дополнительно обеспечивается уменьшение длины линии тока за пределами зазора d , поскольку электрическое поле электрета "прижимает" линию тока основного носителя заряда в полупроводнике к электродам, уменьшает время его дрейфа вдоль этой

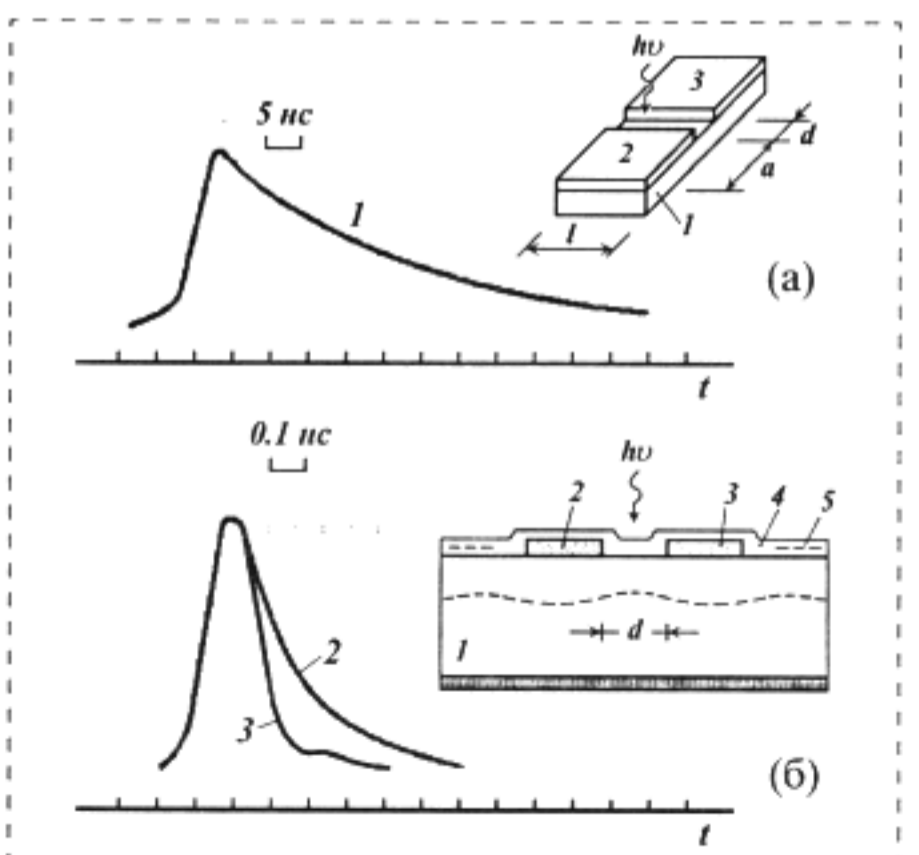


Рис. 9

линии, т. е. повышает быстродействие фотоприемника. При этом электретное покрытие 4 может быть заряженным не только по краям электродов, но и по всей площади фотоприемника или приемной матрицы приборов.

Экспериментальные образцы фотоприемников с электретным покрытием имеют большее быстродействие (кривая фотоотклика 3 на рис. 9, б) по сравнению с фотоприемником без электретного слоя (кривая 2 рис. 9, б), за счет сокращения длительности среза импульса фототока.

Таким образом, проведенные исследования показали, что электретные тонкопленочные элементы при их сочетании с полупроводниковыми приборами твердотельной электроники могут успешно использоваться в приборах микросистемной техники для улучшения их рабочих характеристик.

Список литературы

1. Sessler G. M., West J. E. Elektret transducers: a review // *The J. Of Acoust. Soc. of American*. 1973. V. 53. N 6. P. 1589—1600.
2. Alais P. Real time acoustical imaging with a 256 × 256 matrix of electrostatic transducers // *Acoust. Yologr. New York—London*. 1974. V. 5. P. 671—684.
3. Kuhnel W. Kapazitiver Schallwandler // *Deutsches Patent: DE3807251 Al. Varz* 1988.
4. Kuhel W., Franz J., Hohm D., Heb G. Silucon Subminiature for Airborne Sound // *Acustica*. 1991. V. 73. P. 90—99.
5. Вдовенков В. А., Прокофьева С. П., Усачева Т. Н. Быстродействующие приемники с контактами на барьерах Шоттки // *Журнал технической физики*. 1990. Т. 60. № 2. С. 213—216.
6. Вдовенков В. А., Кузьмина Л. И. и др. Влияние свойств слоев GaInAs на параметры быстродействующих фоторези-

сторов с контактами на барьерах Шоттки // *Неорганические материалы*. 1991. Т. 27. № 8. С. 1575—1578.

7. Вдовенков В. А., Лучников А. П. и др. Применение электретного покрытия в фотоприемниках на барьерах Шоттки // *Известия АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук*. 1990. № 4. С. 73—76.

8. Лучников А. П., Классов В. Н. Стабильность заряда тонкопленочных электретных покрытий // *Техника средств связи. Сер. ЛОСС*. 1990. № 1. С. 34—40.

9. Лучников А. П., Сигов А. С., Камильджанов Б. И. Влияние электронной обработки на свойства вакуумных фторполимерных пленок // *Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах*. 2-я Междунар. конф. Томск: ТПУ. 2000. С. 320—323.

10. Лучников А. П. Термостабильность электретных элементов в конденсаторных электроакустических приемниках // *ПЬЕЗОТЕХНИКА — 2000. Материалы Международной НПК*. М.: МИРЭА. 2000. С. 289—291.

11. Лучников А. П., Классов В. Н., Камильджанов Б. И. и др. Новые ионно-плазменные технологические методы нанесения тонких полимерных покрытий // *Органические полупроводниковые материалы. Химия и технология*. Пермь: ПГУ. 1991. С. 4—14.

12. Gunther P. Charging, Long-term Stability, And TSD Measurements of SiO₂ Electrets // *IEEE Trans. on Electr. Insulation*. 1989. V. 24. N 3. P. 430—442.

13. Вдовенков В. А., Лучников А. А., Филимонов В. В. Электреты на основе оксида кремния // *Техника средств связи. Сер. ЛОСС*. 1990. № 1. С. 29—34.

14. Hohm D., Gerhard-Mulhaupt R. Silirone-dioxide electret transducer // *J. Acoust. Soc. Am*. 1984. V. 75. N 4. P. 1287—1298.

15. Murphe P., Hubschi K., De Rooij N., Racine C. / Subminiature Silicon Integrated Electret Caracitor Microphone // *IEEE Transac. on Electrical Insulation*. 1989. V. 24. N 3. P. 495—498.

16. Swartz R. G., Plummer J. D. Integrated Silicon-PVF2 Acoustic Transducer Arrays // *IEEE Trans. On Electr. Devices*. 1979. V. ED-26. N 12. P. 1921—1931.

17. Bozer C., Alley G. Fabrikation and numerical simulation of the permeable base transistor // *JEEE Trans. On Electroinsulation*. 1980. V. ED-27. N 6. P. 1128.

18. Вдовенков В. А., Засед В. С. Полевой транзистор на барьере Шоттки // *А. с. СССР. № 1220523*. 1984.

19. *Фотоприемники и фотопреобразователи* / Под ред. Ж. И. Алферова и Ю. В. Шмарцева. Л.: Наука, 1986. С. 7—165.

20. Котляков А. В., Лучинин В. В., Четвергов М. В. Сенсоры "жесткого" ультрафиолетового излучения на основе широкозонных материалов // *Микросистемная техника*. 2000. № 2. С. 9—15.

УДК 537.311.322:538.913-405:548.4

В. А. Вдовенков, канд. физ.-мат. наук, доц.
Московский институт радиотехники, электроники
и автоматики (технический университет)
E-mail: vdovenkov@mirea.ru

ЭЛЕКТРОННО-КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ЦЕНТРЫ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрены особенности физических свойств полупроводниковых материалов, содержащих электронно-колебательные центры в связи с возможностью их применения в микросистемной технике.

Введение

Перспективы микросистемной техники в значительной степени зависят от успехов в создании полупроводниковых элементов электронных сис-

тем, от использования новых физических эффектов для выполнения технических функций и обоснованного применения новых материалов. Такие материалы могут несущественно отличаться от традиционных материалов по химическому составу, однако, имея определенные структурные особенности, они способны быть средой, в которой проявляются новые физические эффекты или новые черты известных эффектов. Использование таких материалов в микросистемной технике может обеспечить улучшение или расширение функциональных возможностей известных элементов и приборов, а в ряде случаев и создать принципиально новые приборы. Важным типом структурных нарушений в кристаллах являются электронно-колебательные центры (ЭКЦ), представляющие собой локальные нарушения кристаллической структуры материала, для которых характерно сильное электрон-фононное взаимодействие.

линии, т. е. повышает быстродействие фотоприемника. При этом электретное покрытие 4 может быть заряженным не только по краям электродов, но и по всей площади фотоприемника или приемной матрицы приборов.

Экспериментальные образцы фотоприемников с электретным покрытием имеют большее быстродействие (кривая фотоотклика 3 на рис. 9, б) по сравнению с фотоприемником без электретного слоя (кривая 2 рис. 9, б), за счет сокращения длительности среза импульса фототока.

Таким образом, проведенные исследования показали, что электретные тонкопленочные элементы при их сочетании с полупроводниковыми приборами твердотельной электроники могут успешно использоваться в приборах микросистемной техники для улучшения их рабочих характеристик.

Список литературы

1. Sessler G. M., West J. E. Elektret transducers: a review // *The J. Of Acoust. Soc. of American*. 1973. V. 53. N 6. P. 1589—1600.
2. Alais P. Real time acoustical imaging with a 256 × 256 matrix of electrostatic transducers // *Acoust. Yologr. New York—London*. 1974. V. 5. P. 671—684.
3. Kuhnel W. Kapazitiver Schallwandler // *Deutsches Patent: DE3807251 Al. Varz* 1988.
4. Kuhel W., Franz J., Hohm D., Heb G. Silucon Subminiature for Airborne Sound // *Acustica*. 1991. V. 73. P. 90—99.
5. Вдовенков В. А., Прокофьева С. П., Усачева Т. Н. Быстродействующие приемники с контактами на барьерах Шоттки // *Журнал технической физики*. 1990. Т. 60. № 2. С. 213—216.
6. Вдовенков В. А., Кузьмина Л. И. и др. Влияние свойств слоев GaInAs на параметры быстродействующих фоторези-

сторов с контактами на барьерах Шоттки // *Неорганические материалы*. 1991. Т. 27. № 8. С. 1575—1578.

7. Вдовенков В. А., Лучников А. П. и др. Применение электретного покрытия в фотоприемниках на барьерах Шоттки // *Известия АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук*. 1990. № 4. С. 73—76.

8. Лучников А. П., Классов В. Н. Стабильность заряда тонкопленочных электретных покрытий // *Техника средств связи. Сер. ЛОСС*. 1990. № 1. С. 34—40.

9. Лучников А. П., Сигов А. С., Камильджанов Б. И. Влияние электронной обработки на свойства вакуумных фторполимерных пленок // *Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах*. 2-я Междунар. конф. Томск: ТПУ. 2000. С. 320—323.

10. Лучников А. П. Термостабильность электретных элементов в конденсаторных электроакустических приемниках // *ПЬЕЗОТЕХНИКА — 2000. Материалы Международной НПК*. М.: МИРЭА. 2000. С. 289—291.

11. Лучников А. П., Классов В. Н., Камильджанов Б. И. и др. Новые ионно-плазменные технологические методы нанесения тонких полимерных покрытий // *Органические полупроводниковые материалы. Химия и технология*. Пермь: ПГУ. 1991. С. 4—14.

12. Gunther P. Charging, Long-term Stability, And TSD Measurements of SiO₂ Electrets // *IEEE Trans. on Electr. Insulation*. 1989. V. 24. N 3. P. 430—442.

13. Вдовенков В. А., Лучников А. А., Филимонов В. В. Электреты на основе оксида кремния // *Техника средств связи. Сер. ЛОСС*. 1990. № 1. С. 29—34.

14. Hohm D., Gerhard-Mulhaupt R. Silirone-dioxide electret transducer // *J. Acoust. Soc. Am*. 1984. V. 75. N 4. P. 1287—1298.

15. Murphe P., Hubschi K., De Rooij N., Racine C. / Subminiature Silicon Integrated Electret Caracitor Microphone // *IEEE Transac. on Electrical Insulation*. 1989. V. 24. N 3. P. 495—498.

16. Swartz R. G., Plummer J. D. Integrated Silicon-PVF2 Acoustic Transducer Arrays // *IEEE Trans. On Electr. Devices*. 1979. V. ED-26. N 12. P. 1921—1931.

17. Bozer C., Alley G. Fabrikation and numerical simulation of the permeable base transistor // *JEEE Trans. On Electroinsulation*. 1980. V. ED-27. N 6. P. 1128.

18. Вдовенков В. А., Засед В. С. Полевой транзистор на барьере Шоттки // *А. с. СССР. № 1220523*. 1984.

19. *Фотоприемники и фотопреобразователи* / Под ред. Ж. И. Алферова и Ю. В. Шмарцева. Л.: Наука, 1986. С. 7—165.

20. Котляков А. В., Лучинин В. В., Четвергов М. В. Сенсоры "жесткого" ультрафиолетового излучения на основе широкозонных материалов // *Микросистемная техника*. 2000. № 2. С. 9—15.

УДК 537.311.322:538.913-405:548.4

В. А. Вдовенков, канд. физ.-мат. наук, доц.
Московский институт радиотехники, электроники
и автоматики (технический университет)
E-mail: vdovenkov@mirea.ru

ЭЛЕКТРОННО-КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ЦЕНТРЫ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрены особенности физических свойств полупроводниковых материалов, содержащих электронно-колебательные центры в связи с возможностью их применения в микросистемной технике.

Введение

Перспективы микросистемной техники в значительной степени зависят от успехов в создании полупроводниковых элементов электронных сис-

тем, от использования новых физических эффектов для выполнения технических функций и обоснованного применения новых материалов. Такие материалы могут несущественно отличаться от традиционных материалов по химическому составу, однако, имея определенные структурные особенности, они способны быть средой, в которой проявляются новые физические эффекты или новые черты известных эффектов. Использование таких материалов в микросистемной технике может обеспечить улучшение или расширение функциональных возможностей известных элементов и приборов, а в ряде случаев и создать принципиально новые приборы. Важным типом структурных нарушений в кристаллах являются электронно-колебательные центры (ЭКЦ), представляющие собой локальные нарушения кристаллической структуры материала, для которых характерно сильное электрон-фононное взаимодействие.

**Адиабатическая модель
и собственные колебания кристалла**

Научные исследования ЭКЦ в кристаллах велись более 60 последних лет и относились в основном к центрам окраски в щелочно-галлоидных, т. е. в широкозонных (диэлектрических) кристаллах, а результаты описаны в обзорах и монографиях (см., например [1]). Оптические, тепловые и некоторые другие свойства ЭКЦ были успешно объяснены электронными переходами с неизбежным участием значительного числа фононов, но до создания соответствующих приборов дело не дошло. ЭКЦ в полупроводниковых материалах пока изучены недостаточно, хотя не было объективных причин, ограничивающих такие исследования.

Электронно-колебательные центры обычно представляют собой ассоциации примесных атомов с вакансией, а в полупроводниках благодаря эффекту Яна—Теллера электронные переходы на эти центры сопряжены с участием значительного числа упругих колебаний кристалла. Сведения о колебаниях кристаллов ранее были получены преимущественно из динамического анализа традиционных моделей кристаллов, в которых атомы заменены физическими точками с массами атомов. Эти модели соответствуют представлениям Аристотеля 2500-летней давности об атомарном строении веществ, но противоречат фундаментальным принципам квантовой теории твердых тел, на которой основана современная твердотельная электроника.

Действительно, в традиционных моделях кристаллов электроны и ядра атомов представлены одной частицей и не имеют возможности смещаться друг относительно друга. Вместе с тем адиабатическая теория твердых тел предполагает возможность независимых смещений ядер и электронов. Поэтому электроны и ядро каждого атома в адиабатической модели кристалла должны быть представлены разными частицами. Ясно, что по сравнению с традиционной моделью адиабатическая модель кристалла содержит большее число частиц и, следовательно, имеет большее число дисперсионных ветвей упругих колебаний, среди которых есть собственные (Inherent, *I*) ветви, соответствующие колебаниям ядер относительно системы электронов [2]. Фрагмент адиабатической модели линейной цепочки атомов, представляющей одномерный кристалл, показан на рис. 1, где окружности изображают электронные оболочки с массами *m*, а точки в центрах окружностей — ядра с массами *M*, *n* — номер элементарной ячейки. Ближайшие друг к другу оболочки и ядра связаны упругими силами, которые направлены вдоль оси смещений *U*.

Из решения уравнений движения адиабатической модели следует, что дисперсионные кривые содержат известные акустические (*A*) и оптические (*O*) ветви, а также новые ветви собственных (*I*) колебаний ядер. Динамический анализ показывает,

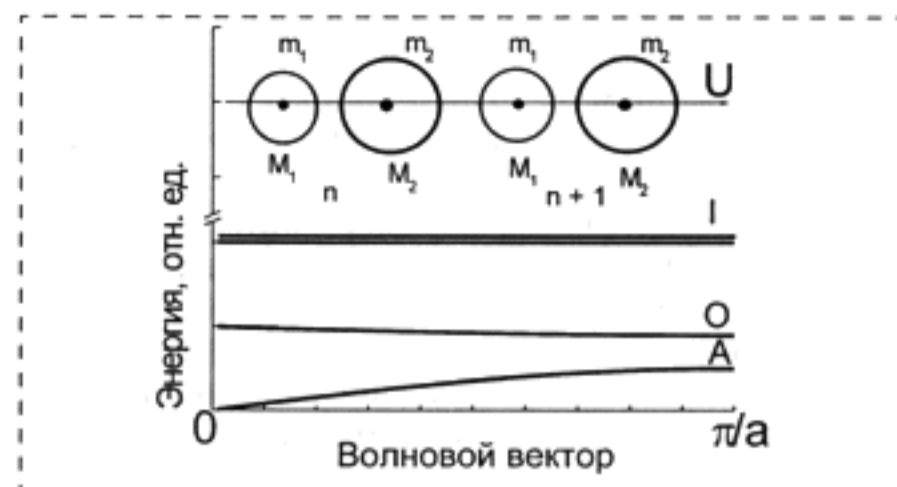


Рис. 1. Дисперсионные кривые акустических (*A*), оптических (*O*) и собственных (*I*) колебаний линейной двухатомной цепочки, адиабатическая модель которой показана в верхней части рисунка

что возможны различные типы *I*-колебаний, отличающиеся смещениями ядра (α -тип), смещениями ядра совместно с *K*-электронами (β -тип) и смещениями ядра совместно с *K*- и *L*-электронами оболочки (γ -тип) относительно окружающей среды в кристалле.

Элементарные кванты *I*-колебаний атомов ($\eta\omega_Z$) с различными атомными номерами (*Z*) были вычислены исходя из атомных волновых функций электронов, определяющих потенциальное поле вблизи центра оболочки, где движется ядро. Кванты *I*-колебаний α -типа можно определить для атомов с $Z > 2$ по следующей формуле:

$$\eta\omega_Z = \eta\omega_2 \left\{ \left(\frac{Z-5/16-\xi}{Z-5/16} \right)^3 \Xi \frac{(Z-\xi)}{Z} \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

где $\eta\omega_2$ — элементарный квант *I*-колебаний атома гелия; $\Xi = 1,2$ учитывает вклад в электронную плотность *2s* и *3s* электронов; $\xi = \sigma Z^{1/3}$; σ учитывает экранировку ядра электронами и изменяется от 1 до 1,15 при увеличении *Z* от 2 до 80.

Кванты *I*-колебаний β -типа можно определить для атомов с $Z > 2$ по формуле (1), положив $\Xi = 0,2$ и $s = \sigma(Z-2)^{1/3}$.

Кванты *I*-колебаний γ -типа можно определить для атомов с $Z > 8$ по формуле (1), положив $\Xi = 0,056$ и $s = \sigma(Z-8)^{1/3}$.

Результаты расчета представлены на рис. 2 светлыми кружками. На этом же рисунке зачерненными кружками указаны экспериментальные значения квантов *I*-колебаний некоторых атомов. Удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных данных доказывает возможность существования *I*-колебаний указанных типов в молекулах и кристаллах.

Представленные сведения о возможности существования *I*-колебаний согласуются с результатами соответствующих расчетов, выполненных методами молекулярной механики [3] и экспериментами других авторов. Установлено, что в кристаллах могут существовать *I*-колебания атомов основного

вещества и волны I -колебаний, а в кристаллах с ЭКЦ возможны также I -колебания примесных атомов в составе ЭКЦ, а также волны I -колебаний примесных атомов. Наличие ЭКЦ является важной особенностью кристаллов, так как именно ЭКЦ обеспечивают в полупроводниках генерацию I -колебаний за счет энергии рекомбинации электронов и дырок на энергетических уровнях таких центров. При этом I -колебательные термы ЭКЦ проявляются как глубокие энергетические уровни в виде энергий активации удельного сопротивления материала, а также в виде характерных энергий оптических и фотоэлектрических спектров.

Оптические спектры материалов, содержащих ЭКЦ

I -колебания определяют оптические свойства материалов и структур, в частности, спектры отражения, поглощения, фотопроводимости, фотоЭДС. На рис. 3 приведен типичный экспериментальный спектр ИК отражения углеродной нанотрубной пленки на молибденовой подложке (кривая $\hbar\omega_{L1}$) и вычисленный по теории отражения заряженным гармоническим осциллятором [4] спектр, учитывающий взаимодействие осциллятора с I -колебаниями атома углерода (кривая $\hbar\omega_{L2}$). Сравнение этих спектров показывает, что они определяются I -колебаниями β -типа атома углерода ($\eta\Omega = 60$ мэВ), а также I -колебаниями α -типа атома углерода ($\eta\omega_6 = \eta\omega_{L1} = 0,25$ эВ) и переходами α -типа атома углерода между I -колебательными состояниями с квантовыми числами $\nu = 0$ и $\nu = 1$ ($\eta\omega_{L2} = 1,5\eta\omega_6 = 0,375$ эВ).

I -колебания ЭКЦ определяют вид и других материалов. Установленный факт влияния I -колеба-

ний на форму спектров материалов, содержащих ЭКЦ, несомненно, можно использовать в экспериментальном материаловедении.

В оптическом процессе на ЭКЦ кроме электронов принимают участие фононы, среднее число которых $S > 1$, чем вызвано стоксово смещение спектров. Установлено, что взаимодействие между электронно-колебательными центрами вызывает обратимое изменение энергий фононов, константы S , а также соответствующие изменения оптических спектров. Данное свойство ЭКЦ использовано в полупроводниковом модуляторе ИК излучения с оптическим управлением [5], позволяющим также регистрировать оптические изображения и изменять спектральный состав изображений с высоким быстродействием при малых затратах мощности на оптическое управление прибором.

Изменения константы S , вызванные взаимодействием между собой ЭКЦ, влияют также на изменение ширины и стоксова смещения спектров фотоЭДС и фотопроводимости. Исследования кинетики этих спектров позволили определить энергии и типы взаимодействующих с ЭКЦ фононов. Эти данные указывают на определенную возможность применения материалов, содержащих ЭКЦ, в оптоэлектронных приборах.

Сверхвысокочастотные колебания электронов на ЭКЦ

Фононы, участвующие в электронно-колебательных переходах на энергетические уровни ЭКЦ, вызывают и осцилляции электронов. Эти осцилляции электронов в содержащих ЭКЦ материалах можно обнаружить в электрических полях с напряженно-

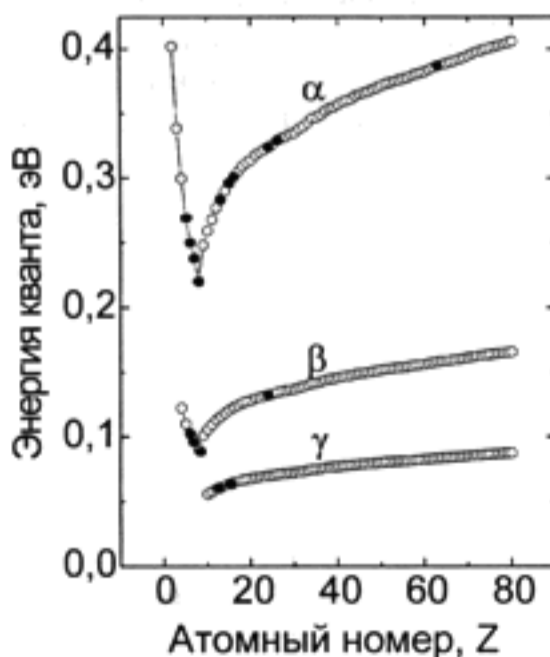


Рис. 2. Зависимость энергии квантов собственных колебаний от атомного номера Z

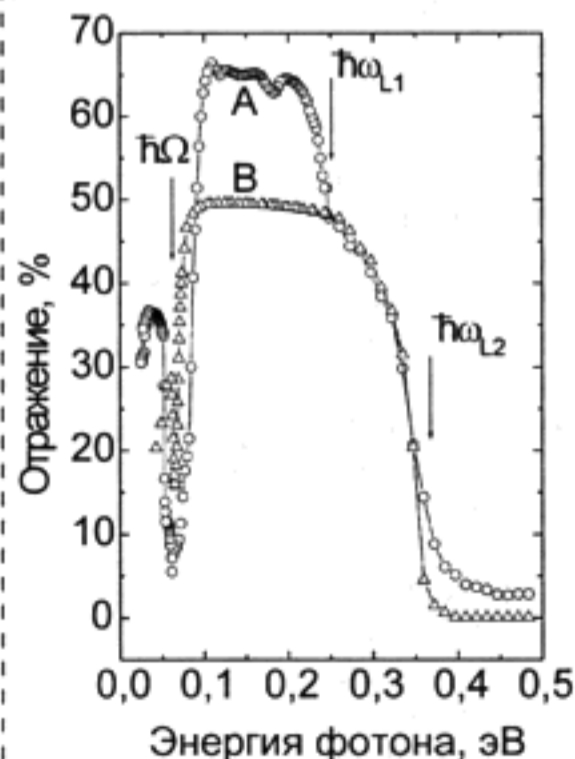


Рис. 3. Спектр отражения углеродной нанотрубной пленки на молибденовой подложке

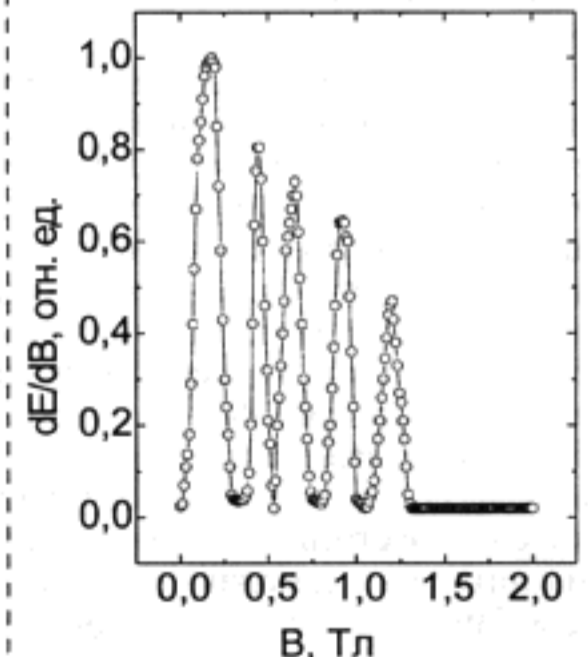


Рис. 4. Зависимость производной электрического поля E по индукции магнитного поля (dE/dB) от индукции B для кремниевого образца

стью на порядок ниже напряженности электрического пробоя бездефектного материала. Внешнее магнитное поле влияет на вольт-амперную характеристику материала благодаря его взаимодействию с колебаниями рекомбинирующих на ЭКЦ электронов таким образом, что при фиксированной плотности тока напряженность электрического поля (E) зависит от индукции магнитного поля (B) немонотонно. Характерная зависимость производной dE/dB от B , измеренная в нормальных условиях при плотности тока 1 А/см^2 в электрическом поле $E \approx 10^3 \text{ В/см}$ в кремниевом образце (КЭФ4,5), содержащем ЭКЦ в концентрации $\approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$, приведена на рис. 4. Данная зависимость содержит осцилляции, затухает при $B > 1,5 \text{ Тл}$ и может быть объяснена с учетом колебаний электронов. Действительно, колебания электрона на ЭКЦ в магнитном поле можно описать следующим уравнением:

$$d^2X/dt^2 + (q/m^*)B(dX/dt) - \omega^2X = 0, \quad (2)$$

где X — обобщенная (конфигурационная) координата; q — заряд электрона; m^* — эффективная масса электрона; ω — циклическая частота колебаний; t — время. Вектор B направлен по нормали к скорости (dX/dt). Осциллирующие решения данного уравнения возможны, если B не слишком велико. При $B \geq (2\omega m^*/q)$ осцилляции невозможны. Следовательно, минимумы представленной на рисунке зависимости можно связать с частотами колебаний, которые подавляются магнитным полем. Учитывая значение эффективной массы электрона в кремнии $m^* = 0,26m_0$, где m_0 — масса покоя электрона, можно оценить частоты этих колебаний. Они лежат в диапазоне от 16 до 70 ГГц. В других полупроводниках с меньшей эффективной массой (GaAs, InSb) соответствующие частоты достигают сотен гигагерц.

Таким образом, показано, что в кремнии, как и в других полупроводниках, электроны на ЭКЦ способны осуществлять СВЧ колебания. Частоты их колебаний можно изменять, например, накладывая магнитное поле определенной величины, чтобы подавить колебания с низкими частотами, выбирая направление магнитного поля вдоль кристаллографических осей с подходящим значением элемента тензора эффективных масс, а также выбирая материал с меньшей или большей эффективной массой электронов для уменьшения или увеличения частоты до сотен гигагерц. Накладывая магнитное поле, можно сузить частотный диапазон колебаний, существенно уменьшить внутренние шумы соответствующих приборов, а также увеличить СВЧ мощность в одной моде колебаний за счет подавления других мод колебаний.

Необходимо отметить, что стационарные СВЧ колебания зарядов в содержащих ЭКЦ полупроводниковых материалах существуют, хотя на вольт-ам-

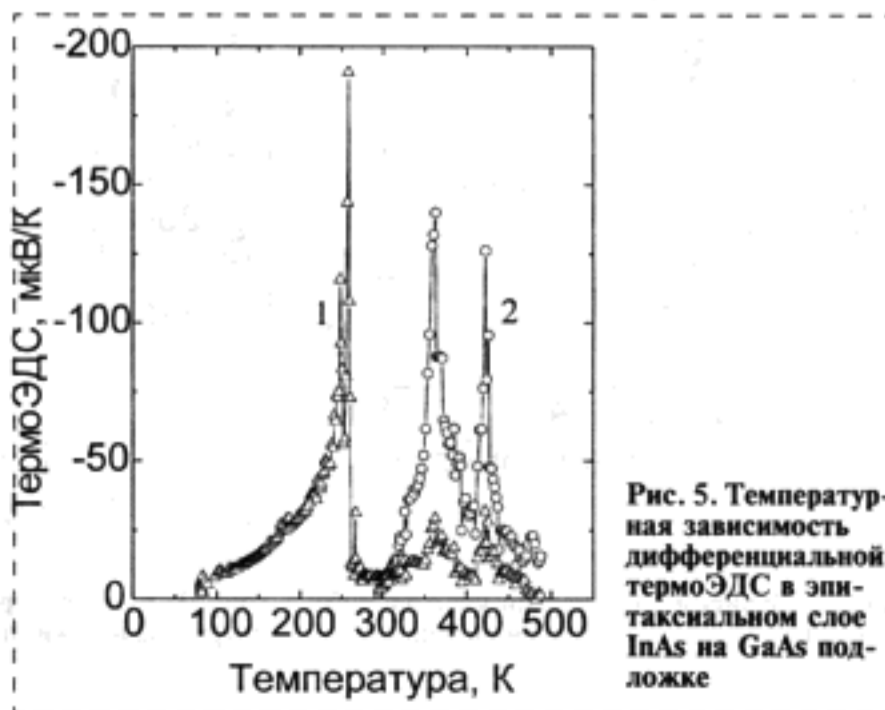
перной характеристике образцов участки с отрицательной дифференциальной проводимостью отсутствуют. Эта важная особенность отличает содержащие ЭКЦ полупроводниковые материалы от других генераторов СВЧ мощности.

Рассмотренный механизм генерации СВЧ колебаний в полупроводниках предоставляет возможность управлять мощностью, частотой и фазой СВЧ колебаний с помощью магнитного, электрического и акустического полей, так как ЭКЦ эффективно взаимодействуют с этими полями.

Согласующиеся с теорией экспериментальные результаты позволяют считать, что кванты I -колебаний превышают энергии фононов. Они эффективно взаимодействуют с фононами и электронами, обеспечивая сильную связь электронов с фононами, благодаря которой кристаллы и кристаллические структуры приобретают новые физические свойства. При наличии ЭКЦ интенсивнее проявляются такие физические эффекты, которые определяются электрон-фононным взаимодействием: увлечение электронов фононами и гиперпроводимость — обусловленная ЭКЦ сверхпроводимость вблизи нормальной температуры и при более высоких температурах.

Увлечение электронов фононами вблизи температур Дебая

Эффект увлечения электронов фононами (УЭФ) ранее наблюдали только при температурах $T < 70 \text{ К}$. Теперь установлено, что в содержащих ЭКЦ полупроводниках этот эффект проявляется вблизи температур Дебая в виде узких полос дифференциальной термоЭДС шириной на порядок менее kT , где k — постоянная Больцмана [2]. Установлено, что в тонких слоях материала на подложках такие полосы УЭФ расположены вблизи температур Дебая фононов подложки. На рис. 5 приведены температурные зависимости дифференциальной термоЭДС в эпитаксиальном слое InAs толщиной 12 мкм



на промышленной подложке из полупроводящего GaAs, содержащие пики УЭФ вблизи дебаевых температур известных фононов GaAs. Кривая 1 на рис. 5 измерена при нагревании материала, а кривая 2 — при его охлаждении. Ввиду малой ширины полос УЭФ имеется очевидная возможность создавать приборы, основанные на эффекте УЭФ и работающие вблизи нормальных и при более высоких температурах, но с низким уровнем внутренних тепловых шумов, соответствующим уровню шумов традиционно охлаждаемых полупроводниковых приборов, например фотоприемников [6].

Гиперпроводимость и теплопроводность гиперпроводников

Обмен фононами между ЭКЦ может обеспечить когерентность электронных состояний и нулевое электрическое сопротивление материала — гиперпроводимость [7]. Температура перехода между нормальным и гиперпроводящим состоянием (T_c) связана с параметрами материала следующим соотношением, полученным из условия стационарной рекомбинации электронов на энергетических уровнях ЭКЦ с константой связи S :

$$n_i \exp\left(-\frac{E_g}{2kT_c}\right) = \frac{N}{S\left(\exp\frac{E(v)}{kT_c} - 1\right)}, \quad (3)$$

где n_i — собственная концентрация и E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника; k — постоянная Больцмана; $E(v) = \eta\omega_Z(1/2 + v)$; v — колебательное квантовое число I -осциллятора ЭКЦ; N — концентрация ЭКЦ. Экспериментально установлено, что связанные с ЭКЦ эффекты возможны, если N удовлетворяет следующим неравенствам: $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3} < N < 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Экспериментальные температурные зависимости электрического сопротивления некоторых гиперпроводников приведены на рис. 6. На рисунке видно, что нулевое сопротивление гиперпроводника достигается при температуре T_c , существует при температуре выше T_c и сохраняется до очень высоких температур, видимо, до температуры плавления материала, а возможно, и в расплавленном материале. Таким образом, гиперпроводимость отличается от сверхпроводимости тем, что когерентность электронных состояний и нулевое электрическое сопротивление существуют при температурах выше T_c , когда концентрация I -колебаний ЭКЦ достаточна высока. На рис. 7 светлыми точками, лежащими между наклонными прямыми 1 и 2, представлены экспериментальные значения T_c для некоторых материалов, а черными точками — вычисленные с помощью соотношения (3) предельные значения T_c при значении $S = 5$, характерном для примесных атомов кислорода. На рис. 7 видно, что вычисленные и экспериментальные значения T_c согласуются между собой, подтвер-

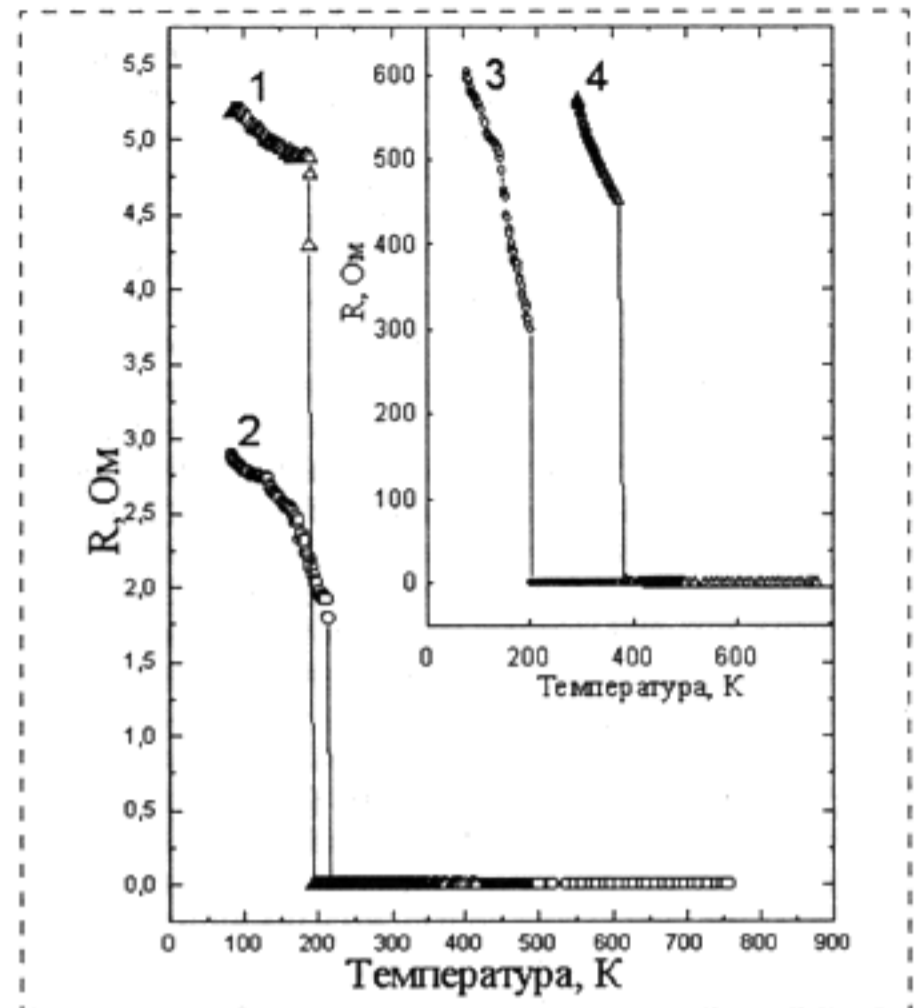


Рис. 6. Температурные зависимости сопротивления R некоторых гиперпроводников: 1 — CdHgTe; 2 — InSb; 3 — Ge; 4 — Si

ждая правильность предполагаемого фононного механизма образования гиперпроводимости. Согласно экспериментальным данным, гиперпроводимость сохраняется в магнитных полях с напряженностью по крайней мере до 1,5 Тл и при плотностях электрического тока порядка десятков ампер на квадратный сантиметр. Однако эти значения полей не следует считать критическими для гиперпроводников, так как экспериментальные образцы, вероятно, являются неоднородными и вопрос о критических значениях полей требует обстоятельных исследований.

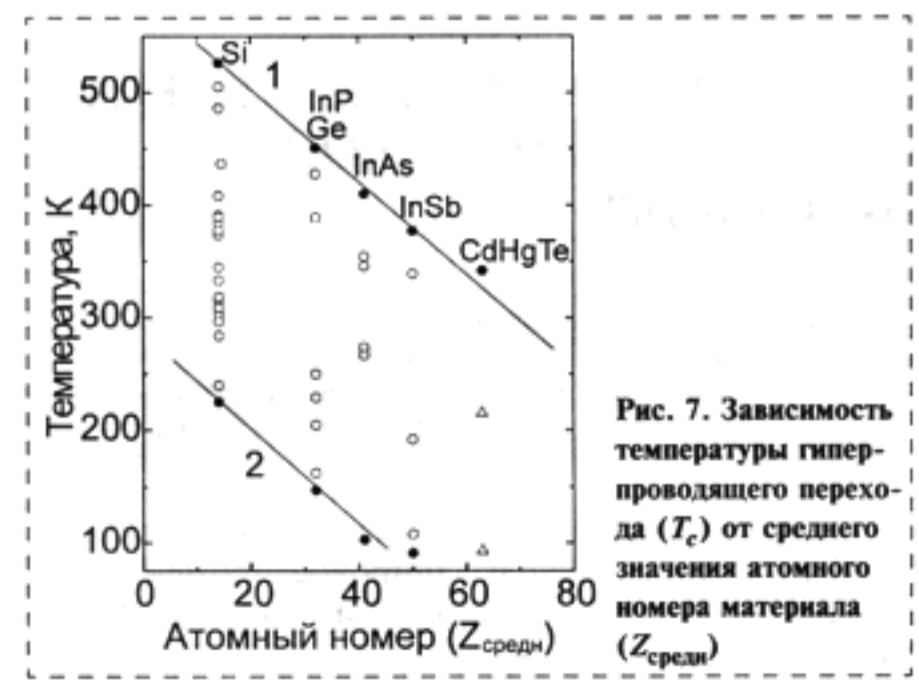


Рис. 7. Зависимость температуры гиперпроводящего перехода (T_c) от среднего значения атомного номера материала ($Z_{ср}$)

Переход материала в гиперпроводящее состояние сопряжено с возникновением эффекта Мейснера, который характерен именно для материалов с нулевым электрическим сопротивлением. В гиперпроводящем состоянии нулевое значение имеет и коэффициент дифференциальной термоЭДС, а теплопроводность гиперпроводника превышает теплопроводность материала в обычном (нормальном) состоянии по крайней мере на 5–6 порядков. Учитывая эти свойства, материалы, содержащие ЭКЦ, можно использовать в типичных сверхпроводящих устройствах, но работающих вблизи нормальных и при более высоких температурах, а благодаря их высокой теплопроводности гиперпроводники можно применять как элементы с исключительно низким тепловым сопротивлением.

I -колебания ядер относительно электронной системы кристалла происходят вблизи центров электронных оболочек атомов или ионов в области с характерным размером 10^{-3} нм (10^{-2} Å) и в этом смысле обусловленные ЭКЦ эффекты можно относить к суббангстремной электронике. Учитывая, что электронные переходы, вызывающие собственные колебания ядер, происходят в пределах элементарной ячейки кристалла, можно эти эффекты относить к нано- или микроэлектронике. Принимая во внимание, что электронно-колебательные процессы на ЭКЦ сопряжены с участием фононов, которые распространяют новые физические свойства на весь объем материала, эти эффек-

ты можно относить и к традиционной электронике. Таким образом, материалы с электронно-колебательными центрами могут найти широкое применение в твердотельной электронике в качестве материальной основы для усовершенствованных приборов, для приборов с расширенными функциями, а также для создания принципиально новых приборов для микросистемной техники, а исследования и применение содержащих ЭКЦ материалов может составить перспективное направление в науке и технике.

Список литературы

1. Парфианович И. А., Пензина Э. Э. Электронные центры окраски в ионных кристаллах. Иркутск: Восточно-Сиб. книжн. изд-во, 1977.
2. Vdovenkov V. A. Phonon-drag Thermopower at high temperatures // ArXiv: condmat/9904299.
3. Pastore G., Smargiassi E., Buda F. // Phys. Prev. 1991. A44, 6334.
4. Noziers P., Pines D. // Phys. Rev. 1964. 134, A1019.
5. Вдовенков В. А. Пространственный оптический модулятор. А. с. СССР № 1228671, 1986 г.
6. Вдовенков В. А. О повышении чувствительности и расширении функциональных возможностей фотоприемников за счет эффекта Зеебека // Межотраслевой сборник научных трудов "Тепловидение". МИРЭА, 2000. С. 57–61.
7. Vdovenkov V. A. Superconductivity at very high temperatures — hyperconductivity // ArXiv: cond-mat/0003190; Сверхпроводимость, обусловленная электронно-колебательными центрами — гиперпроводимость // Межотраслевой сборник научных трудов "Тепловидение". МИРЭА, 2000. С. 33–39; Фазовый переход материала в гиперпроводящее состояние; Материалы международной НТ конференции "Полимеры-2001". МИРЭА, 2001. С. 268–269.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 621.3.049.77.001.2

Б. Г. Коноплев, д-р техн. наук, проф.,
И. Е. Лысенко,

Таганрогский государственный радиотехнический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОЗЕРКАЛА С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИЕЙ

Разработано интегральное микрозеркало с электростатической активацией, изготавливаемое по технологии поверхностной микрообработки. Предложена модель для расчета поворотного узла микрозеркала.

Интегральные микрозеркала с электростатической активацией находят широкое применение в миниатюрных робототехнических системах (в качестве оптических ключей) и системах анализа и

обработки изображений (для отклонения лазерного луча или светового потока) [1–4].

Описанные в литературе [4, 5] микрозеркала с электростатической активацией, выполненные на основе поликремния и алюминия, имеют ряд существенных недостатков. Для микрозеркал, выполненных из поликремния, используется полезная площадь подложки под размещение креплений структурных слоев микрозеркала [5]. Применение в качестве структурного материала для микрозеркал алюминия не позволяет изготавливать данный тип микрозеркал в одном технологическом процессе с другими элементами микрооптоэлектромеханических систем, так как в технологии поверхностной микрообработки нанесение металла проводится на последнем этапе процесса [6].

В настоящей работе приведена конструкция интегрального микрозеркала с электростатической активацией на основе поликремния, изготавливаемого по технологии поверхностной микрообработ-

Переход материала в гиперпроводящее состояние сопряжено с возникновением эффекта Мейснера, который характерен именно для материалов с нулевым электрическим сопротивлением. В гиперпроводящем состоянии нулевое значение имеет и коэффициент дифференциальной термоЭДС, а теплопроводность гиперпроводника превышает теплопроводность материала в обычном (нормальном) состоянии по крайней мере на 5–6 порядков. Учитывая эти свойства, материалы, содержащие ЭКЦ, можно использовать в типичных сверхпроводящих устройствах, но работающих вблизи нормальных и при более высоких температурах, а благодаря их высокой теплопроводности гиперпроводники можно применять как элементы с исключительно низким тепловым сопротивлением.

I -колебания ядер относительно электронной системы кристалла происходят вблизи центров электронных оболочек атомов или ионов в области с характерным размером 10^{-3} нм (10^{-2} Å) и в этом смысле обусловленные ЭКЦ эффекты можно относить к суббангстремной электронике. Учитывая, что электронные переходы, вызывающие собственные колебания ядер, происходят в пределах элементарной ячейки кристалла, можно эти эффекты относить к нано- или микроэлектронике. Принимая во внимание, что электронно-колебательные процессы на ЭКЦ сопряжены с участием фононов, которые распространяют новые физические свойства на весь объем материала, эти эффек-

ты можно относить и к традиционной электронике. Таким образом, материалы с электронно-колебательными центрами могут найти широкое применение в твердотельной электронике в качестве материальной основы для усовершенствованных приборов, для приборов с расширенными функциями, а также для создания принципиально новых приборов для микросистемной техники, а исследования и применение содержащих ЭКЦ материалов может составить перспективное направление в науке и технике.

Список литературы

1. Парфианович И. А., Пензина Э. Э. Электронные центры окраски в ионных кристаллах. Иркутск: Восточно-Сиб. книжн. изд-во, 1977.
2. Vdovenkov V. A. Phonon-drag Thermopower at high temperatures // ArXiv: condmat/9904299.
3. Pastore G., Smargiassi E., Buda F. // Phys. Prev. 1991. A44, 6334.
4. Noziers P., Pines D. // Phys. Rev. 1964. 134, A1019.
5. Вдовенков В. А. Пространственный оптический модулятор. А. с. СССР № 1228671, 1986 г.
6. Вдовенков В. А. О повышении чувствительности и расширении функциональных возможностей фотоприемников за счет эффекта Зеебека // Межотраслевой сборник научных трудов "Тепловидение". МИРЭА, 2000. С. 57–61.
7. Vdovenkov V. A. Superconductivity at very high temperatures — hyperconductivity // ArXiv: cond-mat/0003190; Сверхпроводимость, обусловленная электронно-колебательными центрами — гиперпроводимость // Межотраслевой сборник научных трудов "Тепловидение". МИРЭА, 2000. С. 33–39; Фазовый переход материала в гиперпроводящее состояние; Материалы международной НТ конференции "Полимастеры-2001". МИРЭА, 2001. С. 268–269.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 621.3.049.77.001.2

Б. Г. Коноплев, д-р техн. наук, проф.,
И. Е. Лысенко,
Таганрогский государственный радиотехнический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОЗЕРКАЛА С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИЕЙ

Разработано интегральное микрозеркало с электростатической активацией, изготавливаемое по технологии поверхностной микрообработки. Предложена модель для расчета поворотного узла микрозеркала.

Интегральные микрозеркала с электростатической активацией находят широкое применение в миниатюрных робототехнических системах (в качестве оптических ключей) и системах анализа и

обработки изображений (для отклонения лазерного луча или светового потока) [1–4].

Описанные в литературе [4, 5] микрозеркала с электростатической активацией, выполненные на основе поликремния и алюминия, имеют ряд существенных недостатков. Для микрозеркал, выполненных из поликремния, используется полезная площадь подложки под размещение креплений структурных слоев микрозеркала [5]. Применение в качестве структурного материала для микрозеркал алюминия не позволяет изготавливать данный тип микрозеркал в одном технологическом процессе с другими элементами микрооптикоэлектромеханических систем, так как в технологии поверхностной микрообработки нанесение металла проводится на последнем этапе процесса [6].

В настоящей работе приведена конструкция интегрального микрозеркала с электростатической активацией на основе поликремния, изготавливаемого по технологии поверхностной микрообработ-



Рис. 1. Структура интегрального микрозеркала с электростатической активацией

ки. В разработанной конструкции крепление микрозеркала располагается под структурными слоями, т. е. не требуется дополнительной площади подложки (рис. 1).

При подаче напряжения на один из отклоняющих электродов между ним и структурой микрозеркала возникает электростатическая сила, которая притягивает микрозеркало к отклоняющему электроду. Когда отклоняющее напряжение отключается, микрозеркало под действием силы упругости возвращается в исходное положение.

Электростатическая сила F_{ai} , возникающая между отклоняющим электродом и структурой микрозеркала, определяется следующим выражением [7]:

$$F_{ai} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon \epsilon_0 L_{ai} W_{ai}}{d^2} U_{ai}^2, \quad (1)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость воздушного зазора; ϵ_0 — электрическая постоянная; L_{ai} , W_{ai} — длина и ширина части отклоняющего электрода, расположенной под структурой микрозеркала; d — расстояние между отклоняющим электродом и структурой микрозеркала; U_{ai} — отклоняющее напряжение; индекс i принимает значения 1, 2 для соответствующих отклоняющих электродов. Так, электростатическая сила F_{a1} для электрода 1 будет выражаться через длину L_{a1} и ширину W_{a1} части электрода 1, расположенной под структурой микрозеркала, и напряжение отклонения U_{a1} . Аналогичным будет выражение для силы F_{a2} электрода 2.

Под действием силы F_{ai} структура микрозеркала притягивается к отклоняющему электроду. По закону Гука силе F_{ai} , действующей на микрозеркало, будет противодействовать сила упругости $F_{упр}$, равная по модулю электростатической силе и противоположная по направлению [7]:

$$F_{ai} = -F_{упр} = 2ky, \quad (2)$$

где k — жесткость пластин крепления; y — перемещение, совершаемое пластинами крепления под действием электростатической силы F_{ai} .

Жесткость пластин крепления определяется следующим выражением [7]:

$$k = \frac{EI}{l_k^3},$$

где E — модуль Юнга; $I = \frac{(W_{b1} + W_{ai})}{24} h_1^3$ — момент инерции трапециевидного сечения пластин крепления; $W_{b1} = W_{ai} - 2h_1 \operatorname{tg} \phi$ — ширина поверхности первого структурного слоя; h_1 — толщина первого структурного слоя; ϕ — угол, получаемый в результате анизотропного травления структурных слоев; l_k — длина пластин крепления.

Под действием электростатической силы F_{ai} пластины крепления будут изгибаться по окружностям с центром в точке O , радиусом изгиба R и углом изгиба γ (рис. 2). Для определения малых значений угла изгиба γ (менее 10°) используется следующее выражение:

$$\gamma \approx \frac{y}{l_k}. \quad (3)$$

Как показали результаты моделирования при расчете электростатической силы F_{ai} , необходимо учитывать отклонение x_{ai} структуры микрозеркала, а перемещением пластин крепления можно пренебречь, так как оно является незначительным по сравнению с размерами микрозеркала. Тогда из

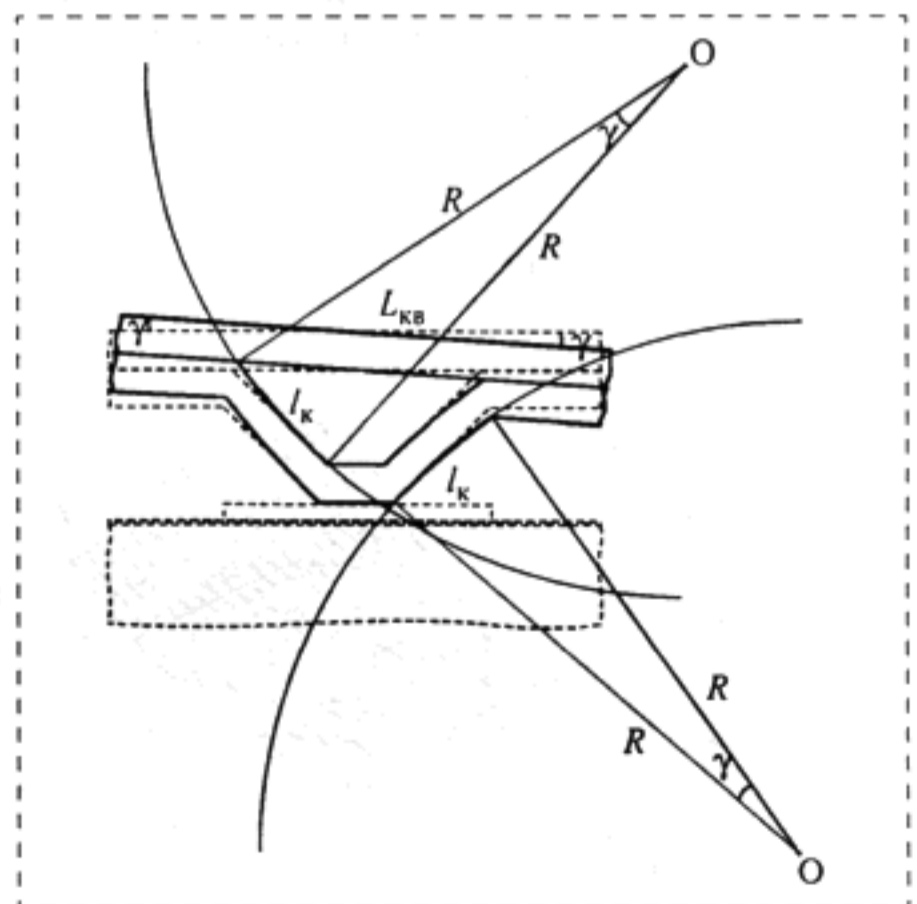


Рис. 2. Модель движения структуры микрозеркала

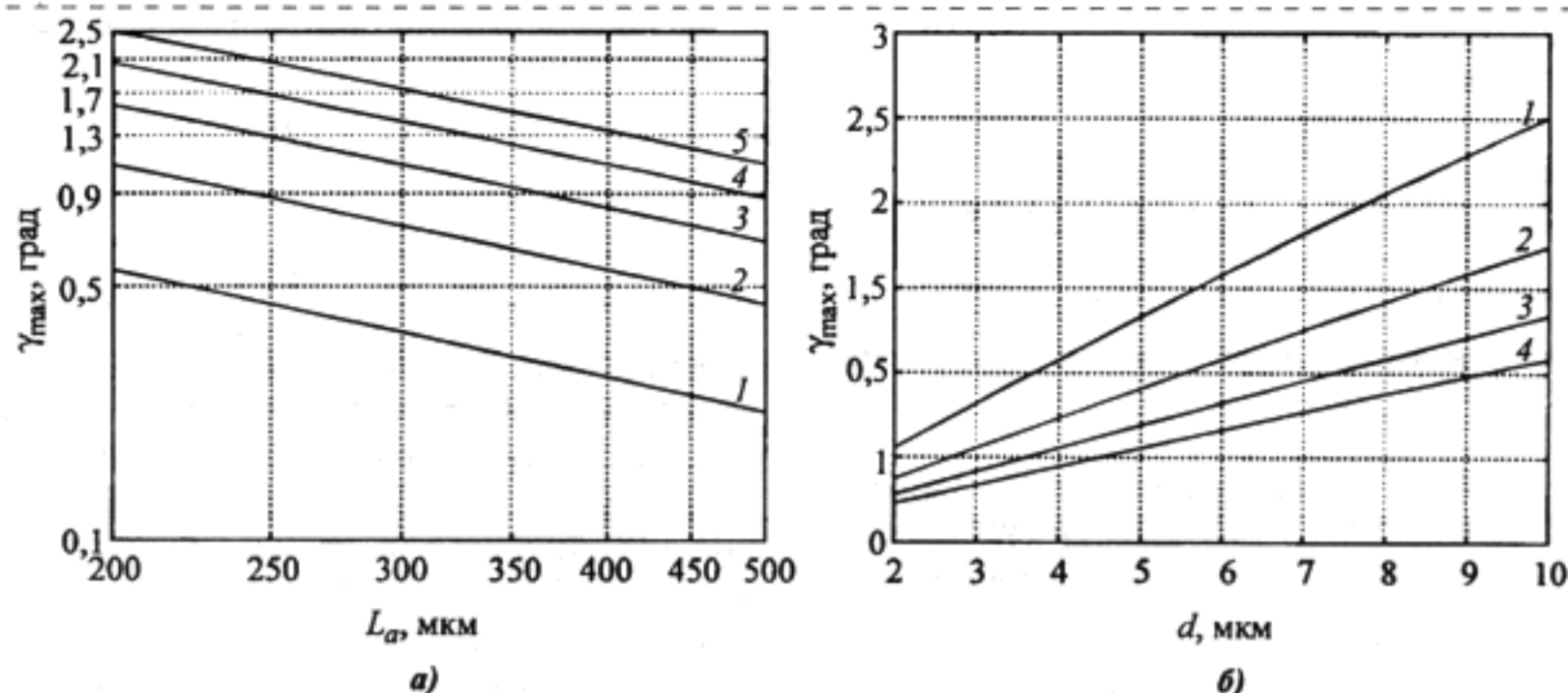


Рис. 3. Зависимости максимального угла поворота структуры микрзеркала γ_{\max} от L_a (а) при $d = 2; 4; 6; 8; 10$ мкм (кривые 1–5 соответственно) и от расстояния d (б) между отклоняющим электродом и структурой микрзеркала при $L_a = 200; 300; 400; 500$ мкм (кривые 1–4 соответственно)

(1)–(3) получим выражение для определения угла изгиба:

$$\gamma = \frac{1}{4} \frac{\epsilon\epsilon_0 L_{ai} W_{ai}}{kl_k (d - x_{ai})^2} U_{ai}^2, \quad (4)$$

где x_{ai} — отклонение, совершаемое структурой микрзеркала в сторону отклоняющего электрода,

$$x_{ai} = \gamma(L_{ai} + d(2 + \text{ctg}\theta) + 0,5L_{\text{KH}}), \quad (5)$$

где L_{KH} — длина основания крепления структуры микрзеркала; θ — угол травления жертвенного слоя.

Из (5) при $x_{ai} = d$ получим выражение для определения максимального угла поворота структуры микрзеркала

$$\gamma_{\max} = \frac{d}{(L_{ai} + d(2 + \text{ctg}\theta) + 0,5L_{\text{KH}})}. \quad (6)$$

Из (4) можно получить выражение для напряжения замыкания, при котором произойдет контакт структуры микрзеркала и отклоняющего электрода:

$$U_{ai}^* = \frac{4}{3} \gamma_{\max} \sqrt{\frac{kl_k d}{3\epsilon\epsilon_0 W_{ai}}}. \quad (7)$$

Если $L_{a1} = L_{a2} = L_a$, то $x_{a1} = x_{a2} = x$; $U_{a1} = U_{a2} = U$; $U_{a1}^* = U_{a2}^* = U^*$. Тогда выражения (4)–(7) принимают следующий вид:

$$\gamma = \frac{1}{4} \frac{\epsilon\epsilon_0 L_a W_a}{kl_k (d - x)^2} U^2;$$

$$x = \gamma(L_a + d(2 + \text{ctg}\theta) + 0,5L_{\text{KH}});$$

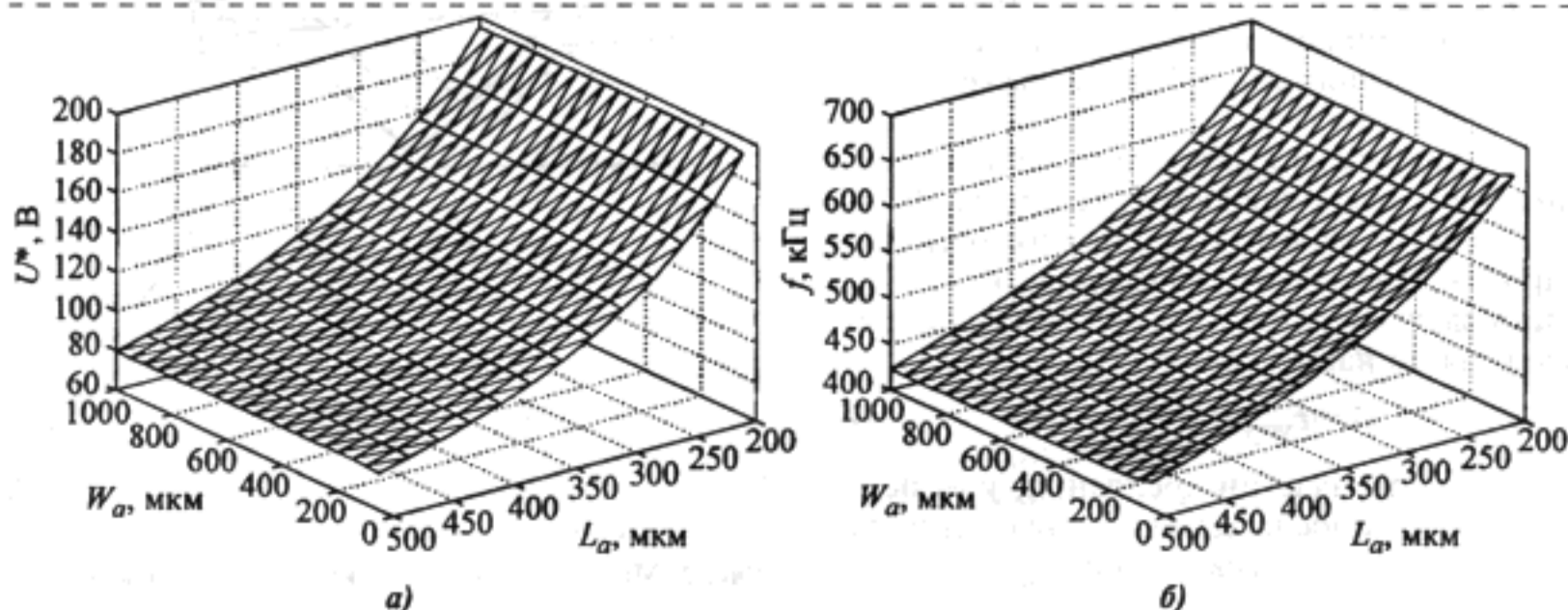


Рис. 4. Зависимости напряжения замыкания U^* (а) и частоты гармонических колебаний f (б) микрзеркала от длины L_a и ширины W_a части отклоняющего электрода, расположенного под структурой микрзеркала

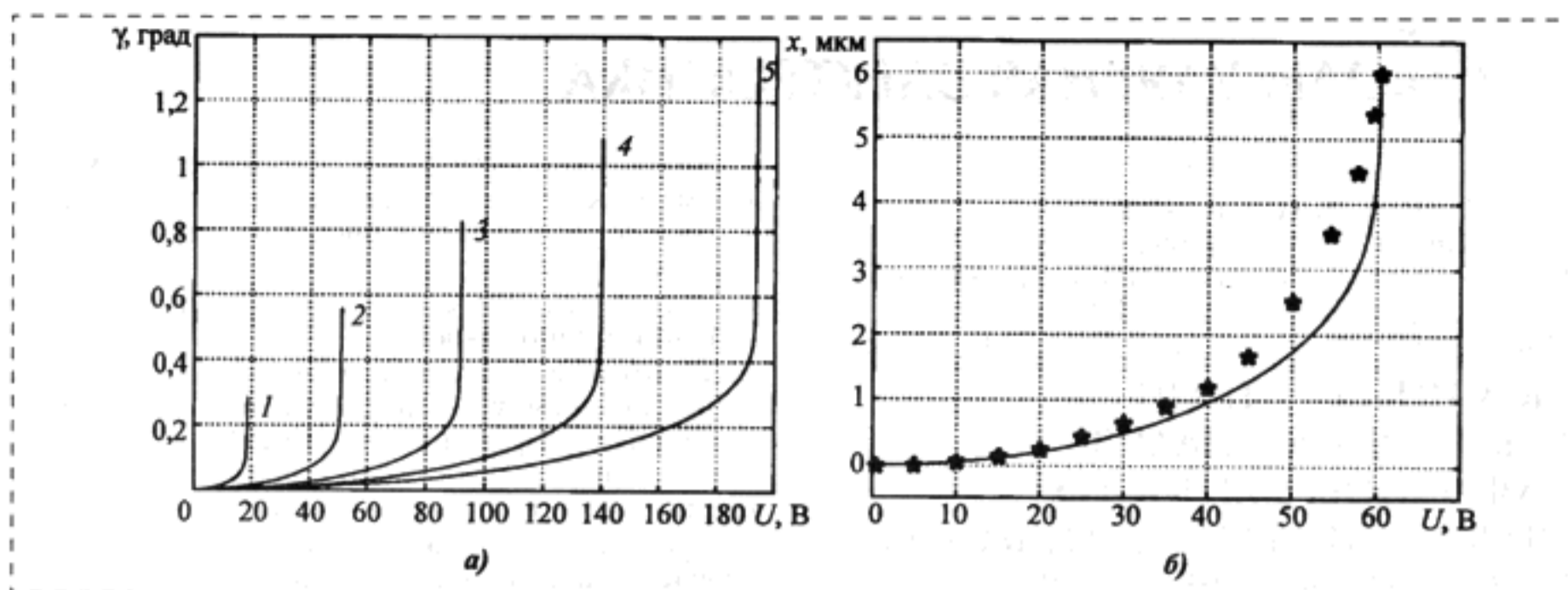


Рис. 5. Зависимость угла поворота структуры микрзеркала γ при $d = 2; 4; 6; 8; 10$ мкм (кривые 1–5 соответственно) (а) и отклонения структуры микрзеркала x при $d = 6$ мкм (б) от отклоняющего напряжения U

$$\gamma_{\max} = \frac{d}{(L_a + d(2 + \operatorname{ctg}\theta) + 0,5L_{\text{кн}})};$$

$$U^* = \frac{4}{3} \gamma_{\max} \sqrt{\frac{kl_{\text{к}}d}{2\epsilon\epsilon_0 W_a}}.$$

Быстродействие (максимальная частота вынужденных колебаний) микрзеркала ограничивается частотой собственных упругих колебаний микрзеркала. Согласно закону Гука вызванная деформацией сила пропорциональна значению деформации. Частота упругих гармонических колебаний структуры микрзеркала определяется следующим выражением [7]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{w_0^2 - 2\beta^2}, \quad (8)$$

где $w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ — собственная частота колебаний микрзеркала; m — масса колебательной системы микрзеркала; β — коэффициент затухания.

Из (8) с учетом геометрии структуры микрзеркала получим выражение

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3k}{\rho(2h_1 W_a(L_{\text{н1}} + 2d + l_{\text{к}}) + h_2 W_{\text{н2}} L_{\text{н2}})} - 2\beta^2},$$

где ρ — плотность поликремния; h_2 — толщина второго структурного слоя; $L_{\text{н1}} = 2L_a + L_{\text{кв}} + 4d$ — длина основания первого структурного слоя; $L_{\text{кв}}$ — длина поверхности крепления; $L_{\text{н2}} = L_{\text{н1}} - 2(T - h_2 \operatorname{tg}\phi)$ — длина основания второго структурного слоя; T — технологическая норма изготовления; $W_{\text{н2}} = W_a - 2(T - h_2 \operatorname{tg}\phi)$ — ширина основания второго структурного слоя.

С использованием предложенной модели проведено моделирование характеристик микрзеркала. Некоторые результаты моделирования представлены на рис. 3–5.

Срез зависимости угла поворота γ от отклоняющего напряжения U (рис. 5, а) соответствует режиму замыкания структуры микрзеркала и отклоняющего электрода. На рис. 5, б наряду с результатами моделирования отклонения структуры микрзеркала x с использованием предложенной модели приведены результаты численного моделирования [3] (пакет программ ANSYS [8]). Показано, что погрешность моделирования по сравнению с численными методами не превышает 10 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ (проект 208.06.01.004 в рамках раздела "Микро- и наносистемная техника" научно-технической подпрограммы "Электроника" программы "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники").

Список литературы

1. Бочаров Л. Ю., Эпинатьев И. Д. Состояние и перспективы развития подводных мини- и микроробототехнических систем за рубежом // Микросистемная техника. 2000. № 4. С. 39.
2. Bulk-etched surface micromachined and flip chip integrated micromirror array for infrared applications / A. Tuantranont, L.-A. Liew, V. M. Bright et al. // URL: <http://mems.colorado.edu>.
3. Jung K., Lee J., Choi B. Numerical analyses of the micromirror for projection TV using FEM // Microsystem Technologies. 2001. N 7. P. 75–79.
4. Fujita H., Toshiyoshi H. Optical MEMS // IEICE Trans. Electron. 2000. Vol. E83-C, N 9. P. 1427–1434.
5. Michaliecek M. A. Introduction to micromechanical systems // URL: <http://mems.colorado.edu>.
6. Koester D. A., Mahadevan R., Hardy B., Markus K. W. MUMPs design handbook // Revision 5.0. URL: <http://www.mem-srus.com>.
7. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. М.: Мир, 1982. 520 с.
8. ANSYS Manual. ANSYS Inc. URL: <http://www.ansys.com>.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 612.015.3.083]:543.426

А. В. Чудинов, А. П. Савицкий,
В. Н. Злобин, д-р техн. наук,
ГНЦ — Государственный НИИ биологического
приборостроения Минздрава РФ,
Институт биохимии им. А. Н. Баха РАН, Москва

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ УЛЬТРАМИКРОАНАЛИЗ ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Обсуждается метод одновременного определения биологических и химических веществ, основанный на флуоресценции ионов европия с использованием хелатов. Предлагается перспективный подход к синтезу новых высокоэффективных хелатов европия, основанный на получении тетраакис-дикетонатного комплекса европия с фиксированным расположением лигандов вокруг центрального иона европия.

Грядущая революция в методологии биологических анализов по связыванию *in vitro* будет заключаться в минимизации жидкой фазы эксперимента и очень быстром определении большого числа образцов [14]. Один из существенных элементов приборов для таких процедур — ультрачувствительная система определения. Флуоресцентные системы детекции являются наиболее перспективными по следующим причинам:

- исключительно высокая чувствительность (вплоть до определения единичных молекул);
- измерения в реальном масштабе времени (миллисекунды на образец или ряд образцов);
- простота автоматизации;
- простота адаптации к измерениям в микрообъеме;
- длительное время хранения маркированного реагента.

В последнее десятилетие метки, основанные на флуоресценции ионов металлов, особенно лантанидов, получили широкое распространение как в исследовательской работе, так и в клинической практике. Это связано с тем, что в комплексе с β -дикетонами предел обнаружения одного из лантанидов — ионов европия — достигает 10^{-15} моль/л [38].

Как известно, ионы лантанидов, в частности европия, не образуют металлоорганических соединений и для маркирования биологических объектов необходимо использовать соединения, которые способны вступать в координационную связь с металлами с высокой константой связывания, — так называемые хелаты. Хелаты для маркирования биологических веществ ионами европия должны обладать следующими свойствами:

- эффективно связывать европий в комплексе;
- иметь активные функциональные группы, способные связываться с биологическими веществами;
- быть хорошими сенсibilizаторами флуоресценции ионов европия.

С момента появления TR—FIA (time-resolved fluoroimmunoassay — флуоресцентный анализ с временным разрешением — ФАВР) [32] ведутся интенсивные поиски таких трифункциональных хелатов — сенсibilizаторов флуоресценции ионов европия. Наиболее эффективное решение этой проблемы на сегодняшний день состоит в разделении как минимум двух функций: прочного связывания и сенсibilизации флуоресценции европия. На первой стадии проводится связывание европиевой метки с биологическими веществами через производные полиаминполикарбоновых кислот, комплексы которых с европием почти не флуоресцируют, а определение сигнала флуоресценции происходит в специальном усиливающем растворе, вызывающем диссоциацию европия из комплекса с полиаминполикарбоновой кислотой и образующем новый комплекс с сенсibilizатором флуоресценции европия, но при этом точка биоаффинного взаимодействия в пространстве полностью теряется. Это элегантное решение, названное DELFIA (диссоциативный усиленный лантанидный флуоресцентный иммуноанализ) [17], эффективно для микротитровальных планшетов подобно твердофазному иммуноферментному анализу и не применимо для флуоресцентной микроскопии, биомикрочипов, биосенсоров и других подобных устройств.

Значительно позже был разработан метод, в котором хелатирующие соединения имели все три свойства, отмеченные выше. Известно, что хелаты, которые являются хорошими сенсibilizаторами флуоресценции лантанидов, связываются с ними со значительно более низкими константами, чем полиаминполикарбоновые кислоты. Одним из хелатов такого типа является 4,7-бис(хлорсульфофенил)-1,10-фенантролин-2,9-дикарбоновая кислота, который используется в методе, получившем коммерческое наименование FIAGEN. В присутствии избытка европия предел обнаружения этого хелата составляет 10^{-1} моль/л [15]. Все другие хелаты, описанные для применения в иммуноанализе, имеют подобный предел обнаружения [9, 19, 22, 26, 35, 37], который довольно далек от предела обнаружения β -дикетонатных комплексов европия [38].

Одним из наиболее интересных подходов к синтезу хелатов лантанидов был предложен М. Vailly с соавторами [6], которые предложили хелат гибкой структуры для ионов тербия — циклический диангидрид диэтилентриаминпентауксусной кислоты. Сначала он был конъюгирован с эквимо-

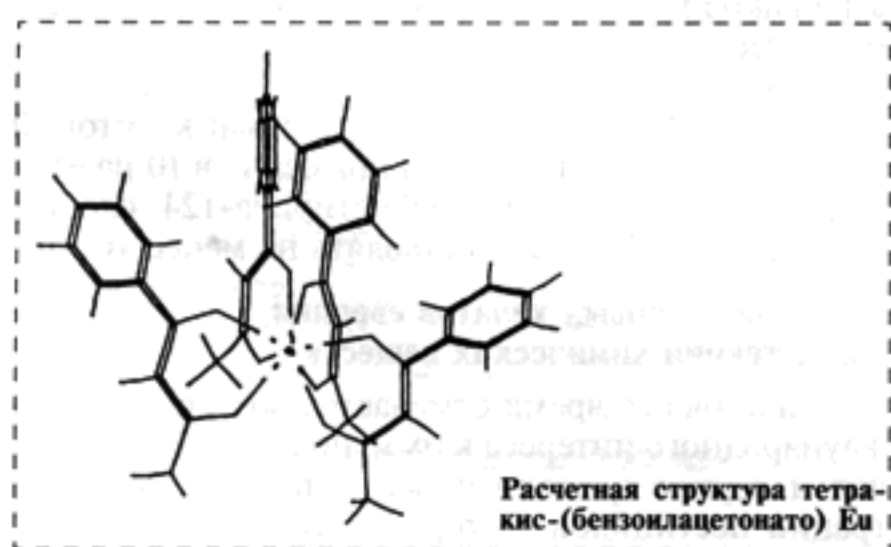
лярным количеством 5-аминосалициловой кислоты (сенсibilизатор), а затем — с белком. В присутствии избытка ионов тербия этот конъюгат может определяться вплоть до 10^{-9} моль/м. Тот же подход использовался для приготовления хелата европия с карбостирилом-124 в качестве сенсibilизатора. Однако оба хелата менее эффективны, чем трис-комплекс с β -дикетонами, так как в обоих случаях образуется монокомплекс лантанида с молекулой сенсibilизатора.

Наш подход к созданию новых высокоэффективных хелатов состоит в том, чтобы синтезировать хелат, в котором правильно ориентированные молекулы сенсibilизатора флюоресценции европия химически зафиксированы. Для решения этой проблемы мы проанализировали данные по рентгеноструктурному анализу β -дикетонатных комплексов лантанидов. Ион европия образует два типа комплексов с β -дикетонами: трис- и тетракис. В обоих комплексах ион европия восьми координирован и связан с восемью атомами кислорода, находящимися в плоскостях квадратной антипризмы [1, 3]. Наиболее интересная особенность всех бензоилацетонатных комплексов лантанидов состоит в том, что бензол- и метил-радикалы находятся на противоположной стороне плоскости, проходящей через центры β -дикетонатных металлоциклов (см. рисунок) [3]. Это создает благоприятные условия для поперечного связывания фенильных колец. Для европиевых хелатов, содержащих четыре β -дикетона, можно ожидать чувствительность обнаружения на 25 % выше, чем в методе DELFIA, поскольку в усиливающем растворе образуется преимущественно трис-комплекс. Наши предварительные результаты для такого типа хелата опубликованы в работах [2, 27].

Новые подходы к синтезу хелатов европия

Наша стратегия разработки новых хелатов базируется на молекулярном конструировании европиевых хелатных комплексов. Молекулярное конструирование хелатов подразумевает следующие этапы:

- молекулярно-механические расчеты трехмерной структуры комплексов;
- химический синтез;



- измерение и анализ флюоресцентных характеристик;
- проверку в условиях реального биоанализа;
- оптимизацию условий биоанализа.

Основная идея работы заключается в получении тетракис-дикетонатного комплекса европия с фиксированным расположением лигандов вокруг центрального иона европия. Лиганды, входящие во внутреннюю координационную сферу европия, необходимо оптимизировать по размерам, конфигурации и химическому строению для максимальной флюоресценции комплекса в условиях реального биоанализа.

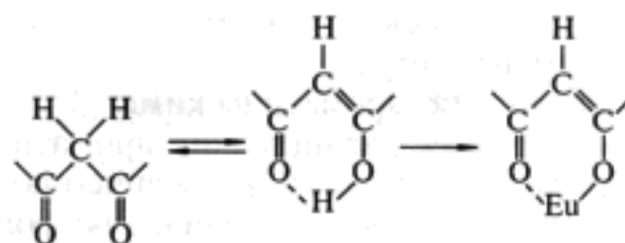
Комплекс должен обладать максимальным коэффициентом молекулярной экстинкции, максимальным квантовым выходом флюоресценции, максимальной термодинамической стабильностью, максимальной кинетической стабильностью, из координационной сферы европия должна быть полностью удалена вода-тушитель флюоресценции.

Для оптимизации стратегии химического синтеза новых соединений необходимо провести молекулярно-механические расчеты трехмерной структуры различных Eu-хелатов. Идея заключается в минимизации длин связей и угловых напряжений на основе хорошо известных данных рентгеноструктурного анализа. В первую очередь необходимо моделировать соединения, обеспечивающие достижение определенных количественных характеристик хелата. Для получения соединений с максимальным поглощением света необходимо проанализировать β -дикетоны с различными арильными заместителями. Для европиевых хелатов также важны фторалкильные заместители в β -дикетонах. Функционально хелатный комплекс построен из фрагментов (групп, радикалов), каждый из которых выполняет определенные функции. В первом приближении можно рассматривать функции этих фрагментов как независимые и конструировать из них комплекс. Реально эти фрагменты взаимно влияют друг на друга, и поэтому необходимо синтезировать несколько оптимальных с теоретической точки зрения комплексов, чтобы затем экспериментально выбрать наиболее подходящий.



1. Центральный ион европия обеспечивает долгоживущую флюоресценцию с большим стоксовым сдвигом, определяет конфигурацию, расположение лигандов во внутренней координационной сфере. Координационная сфера представляет собой квадратную антипризму. Координационное число 8, состояние окисления +3 [2, 27].

2. β -дикетонатный фрагмент



лять, очень низкие, и флюоресцентный анализ с временным разрешением может иметь преимущества благодаря своей высокой чувствительности. Анализ объектов пищи, окружающей среды и окружения человека в общем понимании подразумевает исследования проб различной природы. Во многих случаях эти пробы обладают собственной высокой флюоресценцией, которая усложняет анализ. Пестициды как объекты исследования представлены соединениями с различными физическими свойствами. Очень важно, что флюоресцирующая детектирующая система применима к системам молекул с варьирующими физическими свойствами. Один из наиболее важных объектов в мониторинге — атразин, который является умеренно полярным соединением. Однако такой высокополярный и высокотоксичный гербицид, как паракуат (paraquat), и высоколипофильный пестицид фенвалерата (fenvalerat), близкий по структуре к группе перитроидов, также представляют несомненный интерес для мониторинга. До настоящего времени атразин остается наиболее широко используемым в мире, обычно его находят в грунте и поверхностных водах, он является основой для регуляции экспорта и импорта многих продуктов питания.

Другая причина сложности анализа атразина заключается в том, что необходимо проводить анализы ряда матриц (образцы почвы, воды и пищи). Дополнительная проблема с пестицидами — уязвимость организма человека с большими уровнями незащищенности, возникающая при их применении. Известно, что атразинмеркапторат (водорастворимый метаболит атразина) является хорошим индикатором биологической экспозиции людей и грызунов. Таким образом, атразин необходимо также анализировать в сыворотке крови и в моче. Поскольку флюоресцентный иммуноанализ с временным разрешением на основе нового хелата минимально чувствителен к фоновому свечению образца, такой подход является наиболее интересным для разработки универсальной диагностической тест-системы.

Одно из направлений развития биосенсоров — их использование в мультианалитном иммуноанализе. Имеются две большие категории таких анализов. В одном случае один анализ нескольких соединений в общем различных химических классов с неперекрестной реактивностью дает серию ответов "да—нет". Это возможно, например, в случае одновременного анализа атразина как члена наиболее общего класса гербицидов (триазины) и диурона как члена другого наиболее общего класса гербицидов. Другой тип мультианалитного анализа включает способность к перекрестной реактивности между двумя похожими аналитами. В этом случае необходимо использовать математическую модель для формулирования качественного и количественного ответа, основанного на интегральном результате нескольких перекрестных иммунологических определений. Такой вариант встречается,

например, в паре "симазин и атразин". Данные соединения отличаются одной метильной группой, но есть антитела с различным сродством к каждому из этих антигенов.

Применение новых хелатов европия в ДНК-диагностике

Наиболее перспективной областью практического применения нового хелата являются методы, основанные на связывании комплементарных участков ДНК. Специфичность метода ДНК-зондов обусловлена сугубо биологическими обстоятельствами (комплементарностью гибридизующихся цепей нуклеиновых кислот), а его чувствительность, базирующаяся на этой специфичности, зависит от ряда параметров: способа подготовки ДНК (мишени и зонда), варианта модификации зонда, условий проведения гибридизации, детектирующей системы, метода подготовки и фиксации объекта для визуального, микроскопического или приборного наблюдения. Предельная чувствительность обнаружения достигается оптимальным сочетанием этих параметров, среди которых существенную роль играют способ введения метки и ее детектирующие возможности.

Для обнаружения гибридов существуют два основных подхода — прямое мечение зондовой нуклеиновой кислоты и прикрепление к ней репортерной группы с последующим детектированием репортера какой-либо меткой. В качестве прямых меток используются радиоактивные изотопы, флюоресцентные красители, ферменты. Флюоресцентное мечение позволяет проводить измерения в режиме реального времени *in situ*, а использование нескольких разноокрашенных меток дает возможность обнаруживать их в одном эксперименте и за более короткое время проводить гибридизацию без разделения связанного и свободного зонда [23, 25, 28, 31]. Среди репортерных групп на первом месте по распространенности стоит биотин, за ним следуют всевозможные гаптены [33]. Для проявления биотин-стрептавидинового (авидинового) взаимодействия используется тот же спектр меток, что и для прямого мечения. Метка или репортерная группа и места их связывания в зондовой нуклеиновой кислоте должны выбираться таким образом, чтобы в наименьшей степени препятствовать проведению гибридизации.

При всем разнообразии существующих способов мечения нуклеиновых кислот следует отметить, что до настоящего времени не создано ни одной универсальной метки, полностью отвечающей требованиям исследователей процесса гибридизации. Ферментная метка достаточно чувствительна, но из-за жестких условий гибридизации ее применение для прямого мечения нуклеиновых кислот затруднено, а использование в непрямом варианте связано с возрастанием числа стадий проявления метки. Кроме того, ферменты, а иногда даже в большей степени их субстраты, очень лабильны, что накладывает строгие ограничения на условия

их хранения и срок службы [4, 13, 16, 21, 24, 34, 36]. Прямое мечение традиционными флюорохромами на основе флюоресцеина или родамина не дает достаточно высокой чувствительности, особенно при обнаружении в нативном или неочищенном материале [5, 7, 11]. В первую очередь это связано с неудовлетворительными спектральными характеристиками самих флюорохромов — с близостью расположения полос возбуждения и регистрации люминесценции. Это приводит в регистрируемый сигнал большое количество рассеянного света, и требуется специальная оптическая коррективировка для его устранения, что приводит к потере полезного сигнала. Кроме того, возникает эффект внутреннего фильтра, не позволяющий использовать большие нагрузки метки. В то же время в этой спектральной области люминесцируют многие органические соединения, являющиеся материалом подложки для проведения гибридизации и собственно биологическими компонентами анализируемых объектов. Чтобы на этом фоне выявить специфическое свечение, принадлежащее метке, приходится вводить дополнительные стадии окрашивания контркрасителями [11, 21, 23] либо подвергать объект длительной фиксации [33]. Кроме того, при использовании для возбуждения подобных красителей непрерывного источника света (например, при микроскопическом наблюдении) происходит их выцветание, для предотвращения которого приходится вводить специальные агенты [20].

Хелаты лантанидов практически свободны от указанных недостатков и успешно применяются в настоящее время в качестве меток или репортерных групп в различных вариантах иммуноанализа [18]. В несколько меньшей степени эта метка используется в гибридизационном анализе нуклеиновых кислот. В связи с этим новый хелат европия, обладающий высокими константами термодинамической и кинетической устойчивости в сочетании с качественными люминесцентными характеристиками, позволяет расширить спектр его возможного применения прежде всего за счет того, что он может быть эффективно использован для прямого мечения нуклеиновых кислот в различных вариантах гибридизационного анализа, особенно в новой технологии биомикрочипов.

Развитие новой методологии биомикрочипов стало возможным в связи с успехами микроэлектроники, компьютерной техники и робототехники. Один из вариантов микрочипа [39] представляет собой полиакриламидную матрицу размером 1×1 см, состоящую из 20 000—30 000 (40×40 мкм) элементов, содержащих различные последовательности 8-мерных олигонуклеотидов. Гибридизация микрочипа с флюоресцентно мечеными нуклеиновыми кислотами контролируется в режиме реального времени одновременно у всех элементов с помощью флюоресцентного микроскопа, снабженного камерой ПЗС. Использование микрочипов весьма ускоряет процесс анализа (секвенирования) нук-

леиновых кислот, выявления их специфических последовательностей и уже было апробировано для обнаружения генетических заболеваний (β -талассемия), а также наличия нитрифицирующих бактерий в объектах окружающей среды. Однако вследствие использования нуклеиновой кислоты, меченной по 5(3)-концу единственной молекулой обычного флюорохрома (производного флюоресцеина или родамина), чувствительность обнаружения оказалась не очень высокой — около 10^{11} — 10^{12} молекул β -талассемической ДНК [39] и 10^8 — 10^9 молекул ДНК нитрифицирующих бактерий [12]. При этом следует отметить, что чувствительность обнаружения ДНК ВИЧ 1-го типа методом сэндвич-гибридизации с проявляющим олигонуклеотидом, меченным хелатом Eu (III) в варианте DELFIA, составляет 10^7 молекул [10].

Дополнительные возможности проведения процесса гибридизации в растворе открывает использование эффекта резонансного переноса энергии между двумя флюорохромами, являющимися донорно-акцепторными парами. Использование в такой паре в качестве донора энергии люминесцирующего хелата Tb (III) или Eu (III) с карбостирильным производным диэтилентриаминпентауксусной кислоты и обычного флюорохрома (соответственно тетраметилродамина [29] или цианинового красителя CY-5,29 [30]) позволяет увеличить чувствительность обнаружения в 25—50 раз по сравнению с классической парой флюоресцеин—родамин. Это обусловлено более высоким процентом переноса энергии с хелата редкоземельного элемента — 88 % для Tb (III) и 91 % для Eu (III) вместо 22—23 % у пары флюоресцеин—родамин, осуществляемого на расстоянии 10 нм и более вместо обычных 1—7 нм.

Таким образом, хелат европия нового типа является тем ключевым соединением, которое позволяет разрабатывать новые методы исследования биологических и химических объектов и новые методы диагностики на принципиально новой инструментальной базе, которая характеризуется исключительно высокой степенью миниатюризации (сопоставимой с прогрессом в области миниатюризации электронно-вычислительной техники) и автоматизацией проведения анализов, практически полностью исключая ручной манипуляции. При этом производительность новых автоматических систем настолько высока, что позволяет даже старые диагностические задачи решать принципиально новым способом, базирующимся на секвенировании отдельных участков ДНК и обнаружении дефектных генов или генов, обуславливающих риск появления определенных заболеваний.

Список литературы

1. Асланов Л. А., Ильинский А. Л., Бутман Л. А., Порай-Кошиц М. А. // Журн. структур. химии. 1967. Т. 8. С. 705.
2. Дубровский Т. Б., Чудинов А. В., Савицкий А. П. // Изв. Рос. АН. Сер. хим. 1993. Т. 1. С. 1555—1559.
3. Ильинский А. Л., Порай-Кошиц М. А., Асланов Л. А., Лазарев П. И. // Журн. структур. химии. 1972. Т. 13. С. 277.
4. Abuin M. et al. // Genome. 1996. Vol 39. N 4. P. 671—679.

5. Amann R. et al. // J. Bact. 1990. Vol. 172. P. 762—770.
6. Baily M. P., Rocks B. E., Riley C. // Analyst. 1984. Vol. 109. N 11. P. 1449—1451.
7. Bauman J. G. J. et al. // J. Histochem. Cytochem. 1981. Vol. 29. P. 238—246.
8. Brecknell D. G., Rabner D. J., Fergusson D. M. // J. mol. Struct. 1985. Vol. 124. P. 343.
9. Bush C. E., Di Michele L. J., Peterson W. R. et al. // Analyt. Biochem. 1992. Vol. 202. P. 146—151.
10. Dalhen P. et al. J. clin. Microbiol. 1991. Vol. 29. N 4. P. 798—804.
11. DeLong E. F. et al. // Science. 1989. Vol. 243. P. 1360—1363.
12. Dubiley S. et al. // Nucl. Acids Res. 1997. Vol. 25. N 12. P. 2259—2265.
13. Edman J. C. et al. // Ibid. 1988. Vol. 16. P. 6235.
14. Eggers M., Ehrlich D. // Hemat. Path. 1995. Vol. 9. N 1. P. 1—15.
15. Evangelista R. A., Pollak A., Allore B. et al. // Clin. Biochem. 1988. Vol. 21. P. 173—178.
16. Fujita S. et al. // Acta histochem. cytochem. 1997. Vol. 30. N 2. P. 165—172.
17. Hemmila I., Dakubu S. US Pat. 4,565,790. 1986.
18. Hemmila I. Applications of Fluorescence in Immunoassays. Chichester, 1991.
19. Hinshaw I. C., Toner I. L., Reynolds G. A. Eur. Pat. Appl. N 0068875. 1983.
20. Hopman A. H. N. et al. // Exp. cell Res. 1987. Vol. 169. P. 357—368.
21. Jablonski E. et al. // Nucl. Acids Res. 1986. Vol. 14. P. 6115—6128.
22. Kankare I., Takalo H., Pasanen P. Eur. Pat. N 0203047. 1986.
23. Leitch I. J. et al. // Genome. 1991. Vol. 34. N 3. P. 329—333.
24. Li P. et al. // Nucl. Acids Res. 1987. Vol. 15. P. 5275—5287.
25. Parkhurst K. M., Parkhurst L. J. // Biochemistry. 1995. Vol. 34. N 1. P. 285—292.
26. Prat O., Lopez E., Mathis G. // Analyt. Biochem. 1991. Vol. 195. P. 283—289.
27. Savitsky A. P., Chyudinov A. V., Krilova S. M. // Advances in Fluorescence Sensing Technology II // Ed. J. R. Lakowicz. 1995. P. 429—434.
28. Schulle P. et al. // Biophys. Chem. 1997. Vol. 66. P. 211—228.
29. Selvin P. R., Hearst J. E. // Proc. nat. Acad. Sci. USA. 1994. Vol. 91. P. 10024—10028.
30. Selvin P. R., Rana T. M., Hearst J. E. // J. Amer. chem. Soc. 1994. Vol. 116. N 13. P. 6029—6030.
31. Sixon S. et al. // Nucl. Acids Res. 1994. Vol. 22. N 4. P. 662—668.
32. Soini E., Hemmila I. // Clin. Chem. 1979. Vol. 25. P. 353—361.
33. Stahl D. A., Aman R. // Nucleic Acid Techniques in Bacterial Systematics / Eds. E. Stackbrandt, M. Goodfellow. New York, 1991. P. 205—248.
34. Tchen P. et al. // Proc. nat. Acad. Sci. USA. 1984. Vol. 81. P. 3466—3470.
35. Vallarino L. M., Harlow P. M., Lief R. C. // Proceedings of Advanced in Fluorescence Sensing Technology / Eds R. Lakowicz, R. B. Tompson. 1993. Vol. 1885. P. 376—385.
36. Viscidi R. P. et al. // J. clin. Microbiol. 1986. Vol. 23. N 2. P. 311—317.
37. Wieder I. US Pat. 4 058 732. 1977.
38. Yamada S., Miyoshi F., Kano K. // Analyt. Chim. Acta. 1981. Vol. 127. P. 195—198.
39. Yershov G. et al. // Proc. nat. Acad. Sci. USA. 1996. Vol. 93. P. 4913—4918.
40. Чудинов А. В., Савицкий А. П., Злобин В. Н. Люминесцентный ультрамикрoанализ для одновременного определения биологических и химических веществ: методология и пути решения // Вестник Российской академии наук. 1999. С. 15—20.

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 621.3.049.77

А. С. Басаев*,
В. Д. Вернер*, д-р физ.-мат. наук, проф.,
С. В. Гаврилов**, **А. И. Галушков****, канд. техн. наук,
А. Н. Денисов**,
В. В. Ермак*, канд. техн. наук, проф.,
В. В. Коняхин**, **Е. В. Кузнецов****,
А. Н. Сауров**, д-р техн. наук, проф.,
Ю. А. Чаплыгин*, д-р техн. наук, проф.,
Н. А. Шелепин**, канд. техн. наук,

*Московский государственный институт
 электронной техники (технический университет),

**НПК "Технологический центр" МИЭТ

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Представлены результаты работы коллектива ученых Московского государственного института электронной техники и НПК "Технологический Центр" МИЭТ по разработке элементной базы для радиоэлектронной аппаратуры нового поколения.

1. Основные результаты работы

Краткое представление работы. Коллективом авторов за период 1995—2000 гг. осуществлены следующие комплексные разработки:

- ряд технологических процессов и маршрутов изготовления БИС гражданского и специального применения;
- конструкции более 15 типов базовых матричных кристаллов различного назначения;
- сквозная система автоматизированного проектирования БИС (САПР "Ковчег");
- ряд библиотек базовых логических и топологических элементов с общим числом более 300 элементов;
- около 30 комплектов конструкторской документации, зарегистрированных в установленном порядке в ЦКБ "Дейтон";
- изданы ряд учебных пособий и описаний серий БМК, САПР и библиотек;
- реализуется разработанная программа РОСЧИП, в рамках которой САПР внедрен в учебный процесс 14 ведущих вузов РФ;
- промышленная версия САПР "Ковчег", которая поставлена и эксплуатируется на четырех промышленных предприятиях РФ;
- к настоящему моменту разработано и изготовлено более 100 типов специализированных БИС на базе БМК серии 5501 и 5503 народнохозяйственного и специального применения.

Перечисленные работы выполнялись в рамках поисковых НИР и прикладных ОКР, успешная реализация которых создала возможность опера-

5. Amann R. et al. // J. Bact. 1990. Vol. 172. P. 762—770.
6. Baily M. P., Rocks B. E., Riley C. // Analyst. 1984. Vol. 109. N 11. P. 1449—1451.
7. Bauman J. G. J. et al. // J. Histochem. Cytochem. 1981. Vol. 29. P. 238—246.
8. Brecknell D. G., Rabner D. J., Fergusson D. M. // J. mol. Struct. 1985. Vol. 124. P. 343.
9. Bush C. E., Di Michele L. J., Peterson W. R. et al. // Analyt. Biochem. 1992. Vol. 202. P. 146—151.
10. Dalhen P. et al. J. clin. Microbiol. 1991. Vol. 29. N 4. P. 798—804.
11. DeLong E. F. et al. // Science. 1989. Vol. 243. P. 1360—1363.
12. Dubiley S. et al. // Nucl. Acids Res. 1997. Vol. 25. N 12. P. 2259—2265.
13. Edman J. C. et al. // Ibid. 1988. Vol. 16. P. 6235.
14. Eggers M., Ehrlich D. // Hemat. Path. 1995. Vol. 9. N 1. P. 1—15.
15. Evangelista R. A., Pollak A., Allore B. et al. // Clin. Biochem. 1988. Vol. 21. P. 173—178.
16. Fujita S. et al. // Acta histochem. cytochem. 1997. Vol. 30. N 2. P. 165—172.
17. Hemmila I., Dakubu S. US Pat. 4,565,790. 1986.
18. Hemmila I. Applications of Fluorescence in Immunoassays. Chichester, 1991.
19. Hinshaw I. C., Toner I. L., Reynolds G. A. Eur. Pat. Appl. N 0068875. 1983.
20. Hopman A. H. N. et al. // Exp. cell Res. 1987. Vol. 169. P. 357—368.
21. Jablonski E. et al. // Nucl. Acids Res. 1986. Vol. 14. P. 6115—6128.
22. Kankare I., Takalo H., Pasanen P. Eur. Pat. N 0203047. 1986.
23. Leitch I. J. et al. // Genome. 1991. Vol. 34. N 3. P. 329—333.
24. Li P. et al. // Nucl. Acids Res. 1987. Vol. 15. P. 5275—5287.
25. Parkhurst K. M., Parkhurst L. J. // Biochemistry. 1995. Vol. 34. N 1. P. 285—292.
26. Prat O., Lopez E., Mathis G. // Analyt. Biochem. 1991. Vol. 195. P. 283—289.
27. Savitsky A. P., Chyudinov A. V., Krilova S. M. // Advances in Fluorescence Sensing Technology II // Ed. J. R. Lakowicz. 1995. P. 429—434.
28. Schulle P. et al. // Biophys. Chem. 1997. Vol. 66. P. 211—228.
29. Selvin P. R., Hearst J. E. // Proc. nat. Acad. Sci. USA. 1994. Vol. 91. P. 10024—10028.
30. Selvin P. R., Rana T. M., Hearst J. E. // J. Amer. chem. Soc. 1994. Vol. 116. N 13. P. 6029—6030.
31. Sixon S. et al. // Nucl. Acids Res. 1994. Vol. 22. N 4. P. 662—668.
32. Soini E., Hemmila I. // Clin. Chem. 1979. Vol. 25. P. 353—361.
33. Stahl D. A., Aman R. // Nucleic Acid Techniques in Bacterial Systematics / Eds. E. Stackbrandt, M. Goodfellow. New York, 1991. P. 205—248.
34. Tchen P. et al. // Proc. nat. Acad. Sci. USA. 1984. Vol. 81. P. 3466—3470.
35. Vallarino L. M., Harlow P. M., Lief R. C. // Proceedings of Advanced in Fluorescence Sensing Technology / Eds R. Lakowicz, R. B. Tompson. 1993. Vol. 1885. P. 376—385.
36. Viscidi R. P. et al. // J. clin. Microbiol. 1986. Vol. 23. N 2. P. 311—317.
37. Wieder I. US Pat. 4 058 732. 1977.
38. Yamada S., Miyoshi F., Kano K. // Analyt. Chim. Acta. 1981. Vol. 127. P. 195—198.
39. Yershov G. et al. // Proc. nat. Acad. Sci. USA. 1996. Vol. 93. P. 4913—4918.
40. Чудинов А. В., Савицкий А. П., Злобин В. Н. Люминесцентный ультрамикрoанализ для одновременного определения биологических и химических веществ: методология и пути решения // Вестник Российской академии наук. 1999. С. 15—20.

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 621.3.049.77

А. С. Басаев*,
В. Д. Вернер*, д-р физ.-мат. наук, проф.,
С. В. Гаврилов**, **А. И. Галушков****, канд. техн. наук,
А. Н. Денисов**,
В. В. Ермак*, канд. техн. наук, проф.,
В. В. Коняхин**, **Е. В. Кузнецов****,
А. Н. Сауров**, д-р техн. наук, проф.,
Ю. А. Чаплыгин*, д-р техн. наук, проф.,
Н. А. Шелепин**, канд. техн. наук,

*Московский государственный институт
 электронной техники (технический университет),

**НПК "Технологический центр" МИЭТ

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Представлены результаты работы коллектива ученых Московского государственного института электронной техники и НПК "Технологический Центр" МИЭТ по разработке элементной базы для радиоэлектронной аппаратуры нового поколения.

1. Основные результаты работы

Краткое представление работы. Коллективом авторов за период 1995—2000 гг. осуществлены следующие комплексные разработки:

- ряд технологических процессов и маршрутов изготовления БИС гражданского и специального применения;
- конструкции более 15 типов базовых матричных кристаллов различного назначения;
- сквозная система автоматизированного проектирования БИС (САПР "Ковчег");
- ряд библиотек базовых логических и топологических элементов с общим числом более 300 элементов;
- около 30 комплектов конструкторской документации, зарегистрированных в установленном порядке в ЦКБ "Дейтон";
- изданы ряд учебных пособий и описаний серий БМК, САПР и библиотек;
- реализуется разработанная программа РОСЧИП, в рамках которой САПР внедрен в учебный процесс 14 ведущих вузов РФ;
- промышленная версия САПР "Ковчег", которая поставлена и эксплуатируется на четырех промышленных предприятиях РФ;
- к настоящему моменту разработано и изготовлено более 100 типов специализированных БИС на базе БМК серии 5501 и 5503 народнохозяйственного и специального применения.

Перечисленные работы выполнялись в рамках поисковых НИР и прикладных ОКР, успешная реализация которых создала возможность опера-

тивного обеспечения элементной базой отечественных разработчиков РЭА.

Развитие технологии изготовления БИС в ГУ НПК "Технологический центр" МИЭТ. НПК "Технологический центр" считает одной из основных задач своей деятельности постоянное совершенствование существующих и разработку новых технологий микроэлектроники. За достаточно короткий срок своего существования (около 10 лет) НПК "Технологический центр" прошел путь от относительно простых технологий с проектными нормами 5–6 мкм до сложнейших технологий изготовления БИС специального применения, использующих методы самоформирования с уровнем технологии 0,8–1,2 мкм, встав в один ряд с ведущими предприятиями российской микроэлектроники.

Серия БМК 5503 гражданского и специального применения. Серия 5503 базовых матричных кристаллов (БМК), имеющих канальную структуру с четырехтранзисторной базовой ячейкой, содержит 8 БМК и представляет собой набор универсальных устройств для реализации различных цифровых и цифроаналоговых БИС с уровнем сложности от 100 до 10 000 условных вентилях. Их применение обеспечивает значительное уменьшение размеров и энергопотребления изделий, повышает их надежность, резко сокращает номенклатуру применяемых микросхем. Серия БМК 5503 имеет сквозную САПР "Ковчег", позволяющую проводить весь цикл разработки БИС. Время разработки проекта БИС в зависимости от ее сложности составляет от 5 дней до 3 месяцев.

Младшие типы БМК 5503 могут быть использованы для замены применяемых в специализированных разработках микросхем серий 130, 133, 1533, 564, 1564 и других, старшие типы БМК — для реализации проектов, разработанных на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Краткие характеристики БМК ряда 5503 приведены в табл. 1.

Испытания БИС данной серии на стойкость к воздействию ионизирующих излучений показали ее высокую устойчивость, что вызвало повышенный интерес разработчиков микроэлектронной аппаратуры для космических аппаратов.

Сквозная интегрированная система проектирования БИС "Ковчег". САПР "Ковчег" предназначена для эксплуатации на персональных компьютерах, имеет на порядок более низкую стоимость по сравнению с зарубежными аналогами, обеспечивает возможность адаптации проектов ПЛИС на БИС и быстрое и бездефектное проектирование.

Система проектирования БИС "Ковчег" включает в себя следующие подсистемы:

- функционально-логического моделирования;
- размещения логических элементов в поле БМК;
- автоматического синтеза топологии;
- верификации топологии;
- оптимизации топологии;

Таблица 1. Краткие характеристики БМК ряда 5503

Тип БМК	Число условных вентилях в поле БМК	Среднее время задержки на вентиль, нс	Рабочая частота, МГц	Размер кристалла, мм	Тип корпуса	Число внешних контактов
5503XM1	576	0,7	30	3,0 × 2,6	H09.28-1B	28
5503XM2	1296		30	3,9 × 3,4	H14.42-2B	42
5503XM4	1728		30	3,9 × 4,1	H16.48-2B	48
5503XM5	3072		30	4,9 × 5,1	H18.64-1B	64
5503XM7	5478		25	6,4 × 6,3	4517Ю-84	84
5503XM8	7722		25	7,3 × 7,3	4226.108-1	100
5503XM9	10710		20	8,4 × 8,4	4229.132-3	120
5503XM10	13362		20	9,3 × 9,3	4229.132-3	132

- расчета временных задержек в схеме с учетом топологии;
- подготовки информации для изготовления микросхем.

САПР "Ковчег" в первую очередь ориентирована на решение задач замещения импортной дорогостоящей элементной базы на отечественную, а также позволяет в ряде случаев отказаться от закупок импортных САПР и рабочих станций для их эксплуатации.

Библиотека логических элементов. Унифицированная библиотека элементов 5503 предназначена для проектирования средствами САПР "Ковчег" различных радиоэлектронных устройств на основе базовых матричных кристаллов серии БМК 5503.

В состав библиотеки входят базовые элементы, имеющие уникальную топологию, а также макроблоки, созданные из базовых элементов. Библиотека содержит буферы, демультимплексоры, дешифраторы, инверторы, компараторы, логические элементы, мультиплексоры, периферийные элементы и драйверы, регистры сдвига, сумматоры, счетчики, триггеры и регистры данных, шифраторы, а также уникальные элементы.

Общее число базовых элементов составляет более 200 типов. Описание библиотеки издано отдельной книгой и доступно широкому кругу специалистов. Книга предназначена для разработчиков РЭА, а также для студентов старших курсов, аспирантов и преподавателей соответствующих специальностей, изучающих современные методы проектирования специализированных БИС.

РОСЧИП — программа подготовки профессиональных разработчиков. На основе данной комплексной разработки НПК "Технологический центр" МИЭТ совместно с Московским государственным институтом электронной техники разработали и начали реализацию программы РОСЧИП, которая, с нашей точки зрения, создает предпосылки для возрождения отечественной школы разработчиков интегральных микросхем и аппаратуры на их основе и может послужить толчком для эффективного развития отечественной микроэлектроники. Программа РОСЧИП предусматривает распро-

странение и внедрение в учебный процесс вузов России современной отечественной САПР БИС "Ковчег" с целью подготовки высококвалифицированных специалистов в области разработки специализированных полузаказных БИС.

Разработка специализированных БИС. В настоящее время ряд организаций (ФГУП "НИИ «Субмикрон»", РКК "Энергия", РНИИ космического приборостроения, МНПК "Авионика", МОКБ "Марс", в/ч 35533 ФСБ России и др.) включили в свои планы использование САПР "Ковчег 2.1" и серии БМК 5503 для оперативного получения специализированных микросхем. Это позволяет значительно снизить стоимость сложной высоконадежной аппаратуры, разрабатываемой в рамках ряда государственных программ. Так, например, применение специализированной БИС 5503ХМ2-142, стоимость которой составляет менее 200 руб., позволила заменить БИС производства США, стоимостью 1500 долл. В одном изделии используется около 200 указанных БИС. Таким образом, использование только одного типа БИС на серии БМК 5503 и только в одном изделии позволило сэкономить около 300 000 долл. США. Следует отметить, что существуют значительные трудности в приобретении микросхем данного типа в США в связи с эмбарго по отношению к России.

2. Применение специализированных БИС на БМК

Элементная база современных авиакосмических и специальных электронных систем. Бортовые вычислительные системы (БВС) авиационно-космического применения представляют сложный распределенный комплекс микросхемной аппаратуры, состоящий из центрального бортового компьютера и множества соединенных с ним блоков управления и контроля. БВС работают в автономном режиме в масштабе реального времени и характеризуются высокими показателями отказоустойчивости при минимальных массогабаритных параметрах и потреблении. Современный этап развития методов и средств создания БВС нового поколения определяют следующие научно-технические направления:

1) использование высокопроизводительных микропроцессоров для создания бортового компьютера;

2) переход на мультиплексные каналы связи между отдельными электронными блоками и, соответственно, возникновение острой необходимости в микросхемах, обеспечивающих обмен данными по мультиплексным шинам;

3) практически полный отказ от микросхем стандартной логики и переход на использование специализированных полузаказных БИС при создании всех интерфейсных схем.

Первое направление обеспечивается за счет целевого государственного финансирования организации производства узкого набора (5—8 типов) аналогов зарубежных микропроцессоров, которые

ми впоследствии могут пользоваться все разработчики БВС. Решение задачи второго направления не требует столь серьезных затрат и предполагалось к выполнению путем обычного размещения заказа на разработку и последующее производство на одном из действующих (в области разработки и производства микросхем) предприятий. Однако специфические требования к технологии и сложность проектирования подобных схем задержали их появление у отечественных производителей. Для обеспечения третьего направления требовалось решить несколько иную задачу. Число типонаменов интерфейсных схем для каждого образца БВС может составить от нескольких десятков до нескольких сотен при мелкосерийных объемах последующего производства. Таким образом, для обеспечения третьего направления современной элементной базой необходимо было решить взаимосвязанные комплексные задачи:

- разработка технологии оперативного мелкосерийного производства большого числа типонаменов интерфейсных БИС;
- разработка методов и средств быстрого и бездефектного проектирования указанных БИС, которые были бы легко доступны разработчикам микроэлектронной аппаратуры.

При этом технология изготовления и средства проектирования БИС должны удовлетворять следующим условиям:

- создаваемые интегральные схемы должны обеспечить необходимый для использования в космических аппаратах уровень радиационной стойкости и сохранять работоспособность в широком диапазоне температур;
- цикл проектирования схем средней сложности (3—5 тыс. эквивалентных вентилей) не должен превышать 1—2 мес.;
- цикл изготовления первых макетных образцов БИС не должен превышать 1 мес.;
- вероятность "бездефектности" проектов новых схем (т. е. соответствия выполняемых функций требованиям заказчика) должна быть более 90 %.

Предварительные испытания серии БМК 5503 на стойкость к воздействию ионизирующих излучений показали ее высокую устойчивость. В результате проведенных испытаний катастрофических отказов и тиристорного эффекта не обнаружено до максимального уровня воздействия. Это вызвало повышенный интерес разработчиков РЭА авиакосмических и специальных электронных систем.

Специализированные БИС народнохозяйственного применения. Серия БМК 5503 уже позволила разработать десятки новых типов БИС для широкого спектра устройств и образцов новой техники. Для иллюстрации области применения БИС на БМК перечислим назначение некоторых микросхем народнохозяйственного применения, разработанных специалистами НПК "Технологический центр" МИЭТ.

Управление технологическими процессами:

- комплект БИС системы контроля микроклимата промышленных объектов.

Энергетика:

- комплект БИС для системы контроля и управления городскими электросетями;
- БИС управления системы катодной защиты магистральных трубопроводов.

Авиационная и космическая техника:

- комплект БИС для системы управления авиационным двигателем;
- БИС мажоритарного элемента для построения систем с резервированием;
- БИС управления радиолокационного спасательного ответчика спутниковой системы спасения терпящих бедствие.

Средства связи и радиотелекоммуникации:

- БИС обработки сигналов аппаратуры телефонной связи;
- БИС управления для переносного радиотелефона;
- БИС универсального демодулятора сигналов радиотекста;
- БИС персонального приемника объектовой сети радиовызова;
- комплект БИС для индивидуального приемника системы радиовызова.

Автомобильная электроника:

- комплект БИС управления автомобильной электроникой;
- БИС таймера системы зажигания легкового автомобиля.

Бытовая техника:

- БИС управления блоком питания бытовой стиральной машины;
- БИС управления бытовым холодильником и морозильником;
- БИС управления мехатронным двигателем электровелосипеда;
- БИС управления прибором выбора лыжной мази;
- БИС спидометра велосипеда.

Телевизионная техника:

- БИС формирования тестовых телевизионных сигналов.

Вычислительные системы:

- БИС 8-разрядного микропроцессора;
- БИС контроллера канала связи RS-232 и Centronics;
- комплект БИС для аналоговой вычислительной машины.

Замена ПЛИС специализированными БИС на БМК. В настоящее время при разработке цифровой аппаратуры активно используются ПЛИС импортного производства. Уже при мелкосерийном выпуске разработанной аппаратуры применение ПЛИС в сравнении с заказными и полузаказными БИС становится нерентабельным. Поэтому типичной является ситуация, когда разработка аппаратуры выполняется на ПЛИС, а серийный выпуск осуществляется на БИС. Однако для отечественного производителя переход от ПЛИС на серийные БИС в настоящее время возможен только через размещение крупных заказов за рубежом, что требует значительных капитальных вложений. Поэтому большинство производителей аппаратуры вынуждены использовать ПЛИС и в серийном производстве, несмотря на значительное повышение себестоимости продукции. Например, одна ПЛИС средней сложности стоит 15–20 долл. и может быть заменена на импортную БИС стоимостью 8–15 долл. Аналогичные по сложности отечественные БИС стоят 4–8 долл. Особенно это актуально для систем специального применения, так как стоимость ПЛИС для специального применения в 100 и более раз превышает стоимость аналогичных ПЛИС общего применения и достигает 1500–2000 долл. за штуку. Покупка указанных ПЛИС затруднена для российских предприятий. Кроме того, ПЛИС требуют проведения дополнительных испытаний для подтверждения их качества, что еще больше увеличивает их стоимость.

БМК серии 5503 могут быть использованы для замены достаточно широкого спектра ПЛИС. Типы, краткие характеристики ПЛИС и их реализуемость на БМК серии 5503 приведены в табл. 2.

Таблица 2. Типы и краткие характеристики ПЛИС

Фирма изготовитель	Семейство ПЛИС	Число условных вентилей	Число используемых контактов	Число типов ПЛИС ($U_{пит} = 5 В$)	Число реализуемых типов на ряде БМК K5503
XILINX	XC2000	600–1500	58–74	2	2
	XC3000	1000–6000	64–320	10	6
	XC3100	1000–7500	64–484	12	6
	XC4000	2000–25000	64–256	12	4
	XC5200	2200–18000	84–244	5	3
Actel	A1010B	1200	34–57	5	5
	A1020B	2000	34–69	7	7
	A1225A	2500	72–83	4	4
	A1240A	4000	72–104	4	4
	A1280A	8000	72–140	5	2
	A1415A	1500	70–80	4	4
	A1425A	2500	70–100	6	6
	A1440A	4000	70–140	5	3
	A1460A	4000–6000	131–168	6	1
	A14100A	10000	175–228	4	0
Altera	Classic	100–500	8–48	22	22
	MAX5000	300–2000	16–64	18	18
	MAX7000	300–3000	32–160	41	36
	FLASHlogic	400–1600	30–172	10	8
	MAX9000	3000–6000	56–212	12	9
	FLEX8000	2000–45000	64–360	28	19
	FLEX10K	10000–100000	150–406	7	0

Примечание: При анализе возможности реализации проектов ПЛИС на БМК серии 5503 в качестве критерия рассматривалось число внешних выводов и объем схем, реализуемых на ПЛИС.

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Ученые разрабатывают атомарную память

В далеком 1959 г., выступая на очередной конференции, Ричард Фейнман высказал мысль о том, что информация, накопленная человечеством в книгах за свое существование, может быть записана в кубе с длиной стороны в одну сотую сантиметра. Таким образом, один бит должен храниться в ячейке, состоящей из $5 \times 5 \times 5 = 125$ атомов.

Ученые из США сообщили о двумерной реализации идеи Фейнмана. Бит кодируется присутствием или отсутствием атома кремния в ячейке, состоящей из $5 \times 4 = 20$ атомов. Запись нуля осуществляется при удалении отдельных атомов с помощью иглы туннельного микроскопа. Как и стандартная память, атомарная память может быть инициализирована, форматирована и прочитана при нормальной температуре. Плотность записи информации по этому методу выше в миллион раз чем на современном CD.

Новая память на атомах была создана путем нескольких операций. Первоначально осаждался моноатомный слой золота на кремниевой пластине с последующим отжигом, происходила самоорганизация золота в виде дорожек шириной по пять атомов. Далее осуществлялось распыление по поверхности атомов кремния, их диффузия и расположение в ячейках на золотых дорожках подобно шарам в лунках. Эти атомы кремния и представляют собой биты информации. Атомы располагаются таким образом, что между ними образуются расстояния, разрешающие ученым выдергивать отдельные частицы с помощью иглы туннельного микроскопа, не действуя при этом на соседние атомы и предотвращая возможность образования ненужных химических связей. Тем не менее потребуются годы, если не десятилетия, до того как память будет использоваться практически. Недостатками новой памяти являются необходимость использования глубокого вакуума и то, что работа сканирующего туннельного микроскопа делает процесс записи/считывания слишком длительным. Более того, с увеличением плотности понижается способность считывания, так как пользователь получает сигнал меньшего уровня.

<http://uw.physics.wisc.edu/~himsel/memory.html>

Hewlett Packard совершил прорыв в молекулярной электронике

В лаборатории Hewlett Packard была создана электронная память, обладающая наивысшей на сегодня плотностью. Созданный 64-битный чип занимает площадь менее 1 мкм^2 и использует молекулярные переключатели. Частота переключений битов при этом в 10 раз превышает соответствующую частоту на кремниевом чипе. Как утверждает директор исследовательского научного центра квантовой физики HP, при изготовлении молекулярных переключающих устройств на кремнии емкость и производительность чипов могут быть неограниченно увеличены при минимальных затратах на изменение технологий.

Чип представляет собой многослойную структуру: на полимерном слое кремниевой пластины пропечатываются 8 параллельных полос, в которые напыляется платина, затем на полученные провода осаждается слой электрически переключаемых молекул и, наконец, сверху под углом 90° напыляются еще 8 проводов. В каждой из полученных 64 ячеек находится 1 бит памяти, состоящий из 1000 молекул. Приложение импульсов напряжения позволяет управлять сопротивлением молекул. Во время измерения сопротивления при низком напряжении ученые смогли считать информацию. Разработчикам также удалось создать демультимплексор. По словам специалистов HP, демультимп-

лексор является важным шагом к практическому использованию молекулярных чипов. Кроме того, это первая демонстрация совместной работы молекулярной логики и памяти в одной наноразмерной схеме.

<http://www.hpl.hp.com>

Наносварка на атомарном уровне

Профессор Политехнического института в Нью-Йорке и его коллеги в Германии, Мексике, Великобритании и Бельгии открыли способ сваривания одностенных углеродных нанотрубок — углеродных цилиндров, обладающих уникальными электрическими свойствами. Это открытие могло бы способствовать развитию производства молекулярных цепей и сетей нанотрубок. Для создания спаев нанотрубок использовались излучение и высокая температура.

Это первый случай сваривания нанотрубок, хотя в литературе уже описаны случаи выращивания многослойных ветвящихся нанотрубок (Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Петрик В. И. Ветвящиеся нанотрубки из углеродной смеси высокой реакционной способности // Известия вузов. Электроника. 2002. № 2. С. 105—106). Электрические свойства однослойных нанотрубок превосходят свойства многослойных, поэтому к ним всегда проявлялся повышенный интерес.

Получение наноспаев было довольно неожиданным результатом, так как однослойные нанотрубки — это цилиндры идеальной формы, без каких-либо дефектов. Для создания переходов между трубками необходимо образовать межуглеродные связи внутри них. При излучении и нагревании возникает достаточное количество дефектов для создания связей, но электрические свойства при этом не теряются. Исследователи использовали специальный высоковольтный электронный микроскоп, с помощью которого можно воздействовать излучением и поддерживать необходимую для эксперимента температуру.

www.rpi.edu

AMD выпустила сверхмалый транзистор с двойным затвором

Длина транзистора 10 нм, что в 6 раз меньше самых маленьких используемых транзисторов. Применяя эту технологию, на одном чипе AMD можно разместить 1 млрд транзисторов вместо возможных сейчас 100 млн.

Эти транзисторы (FinFET) являются разновидностью стандартных полевых транзисторов. В промышленных МОП-транзисторах при уменьшении размеров законы квантовой физики осложняют управление электрическим током, приводя к нагреванию полупроводников и высоким утечкам. В новых транзисторах имеется второй затвор, который обеспечивает лучший контроль и уменьшает утечку тока, благодаря чему размеры транзистора могут быть уменьшены, а ток увеличен.

По словам вице-президента AMD преимущество таких транзисторов заключается и в том, что для налаживания их производства не понадобится глобального изменения уже существующих технологий.

<http://www.amd.com>

Компания Samsung использовала в новейшей флэш-памяти 90-нанометровую технологию

Samsung Electronics начала производство по технологии 90-нм и использовала ее для пилотной партии 2-гигабитных

устройств флэш-памяти. Флэш-память обеспечивает высокоскоростную работу устройств, имея при этом очень маленькие размеры. В устройстве может быть помещена память 4 Гбайт, что эквивалентно информации, хранящейся на 70 CD дисках или 40 мин DVD. Со второй половины 2003 г. Samsung планирует начать производство ДОЗУ емкостью 512 Мбит и 1 Гбит по технологии 90-нм на пластинах размером 300 мм.

Гигабитное устройство памяти — последнее достижение компании Samsung в области флэш-технологий. В среднем, емкость флэш-памяти удваивается каждый год: в 2000 г. — 256 Мбит и 512 Мбит — в 2001 г. Также в августе 2001 г. Samsung начала продажу чипов флэш-памяти емкостью 1 Гбит, изготовленных по технологии в 0,12 мкм.

При общей тенденции производителей памяти добиться уменьшения размеров и большей емкости микросхем, чип компании Samsung, кажется, появился раньше своего времени. Так, по словам главного аналитика Instar/MDR, новый чип не найдется в настоящем времени себе применения, так как сложно представить прибор, использующий флэш-технологии, которому может понадобиться объем памяти 2 Гбита. Кроме того, это довольно дорогое устройство, что также не может положительно влиять на его продвижение на рынок.

<http://www.samsung.com>

Бобринецкий И. И., Гирфанова Н. А.,
Неволин В. К., д-р физ.-мат. наук, Строганов А. А.
<http://www.miee.ru/m/projects/ntmdt/>

РФФИ СТРАНИЧКА РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1—12, 2001 г., № 1—11, 2002 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

<http://intra.rsfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Электро- и магнитооптика гетероструктур с самоорганизующимися InAs квантовыми точками

Номер проекта: 97-02-178002-а

Год предоставления отчета: 1997

В рамках проекта впервые выполнены оптические исследования самоорганизующихся InAs квантовых точек (КТ) в сильном магнитном поле и в условиях высокого давления, продолжены магнитотранспортные исследования самоорганизующихся КТ, внедренных в барьер туннельного диода. В целях верификации особенностей, которые КТ вносят в вольт-амперные характеристики, также проведены контрольные туннельно-транспортные исследования диодов со слоем доноров внутри туннельного барьера.

Одной из задач, поставленных в проекте, являлось исследование электролюминесценции из одиночных КТ. В течение 1997 г. удалось решить технологическую сторону проблемы — создать $p-i-n$ туннельный диод со слоем InAs КТ, внедренных в туннельный барьер, с оптическим окном субмикронных размеров.

Основные полученные результаты заключаются в следующем:

- обнаружена анизотропия диамагнитного сдвига фотолюминесценции (ФЛ) из самоорганизующихся InAs КТ;
- получена оценка пространственной протяженности волновой функции носителей, локализованных в КТ, порядка 60 Å;
- измерен барический коэффициент для линии ФЛ из КТ, на 20 % меньший, чем для ширины запрещенной зоны в Γ -точке в объемных InAs и GaAs; это подтверждает адекватность описания электронных состояний в КТ как относящихся к Γ -долине зоны проводимости;
- достигнуто пересечение Γ - и X-состояний (Γ -X crossover) для самоорганизующихся КТ при высоком давлении;
- получены экспериментальные свидетельства, что в гетероструктуре "InAs КТ—GaAs матрица" для X-состояний реализуется выравнивание зон II типа;
- независимо измерены энергии уровней электронов и дырок в InAs КТ;
- методами туннельного транспорта через одиночную КТ измерено значение g -фактора электрона в InAs КТ;
- в ходе контрольных исследований туннельных диодов со слоем доноров, помещенных в туннельный барьер, незави-

симо измерено расщепление X-долин, связанное с двуслойной деформацией слоя AlAs в GaAs/AlAs гетероструктурах;

- обнаружено необычное поведение магнитоосцилляций туннельного тока через диод при постоянном приложенном напряжении: ток осциллирует в противофазе с концентрацией двумерных электронов в эмиттерном аккумуляционном слое.

Кинетические свойства и теория сверхпроводимости ВТСП и фуллеренов

Номер проекта: 97-02-16705-а

Год предоставления отчета: 1997

Обсуждается система сильно взаимодействующих фермионов в твердом теле. Предложена модель для описания зависимости электронной теплоемкости от температуры во внешнем магнитном поле в области сверхпроводящего перехода. В рамках этой модели рассчитаны транспортные свойства меднооксидных сверхпроводников, которые согласуются с данными по температурной и концентрационной зависимости сопротивления в плоскости ab и вдоль оси c , а также спиновой восприимчивости в слабодопированных и оптимально допированных образцах LSCO. Теоретически описаны экспериментальные данные по фотоиндуцированной оптической проводимости в YBCO для различных уровней допирования. Обнаружено, что слабодопированные и оптимально допированные образцы описываются разным типом скейлинга, связанным с различной температурной зависимостью щели в спектре возбуждений. Получены спектры возбуждений и структура синглетных и триплетных 5-частичных состояний. Показано, что разумный выбор параметров гамильтониана приводит к малой эффективной массе локальных пар. Получено выражение для вершины взаимодействия пары с внешним полем. Несколько независимых экспериментов (туннельные эксперименты, рассеяние нейтронов при низких температурах, инфракрасное поглощение) объясняются на основе развитого формализма и единым выбором параметров гамильтониана. Предложена микроскопическая теория взаимодействия длинноволновых фононов с электронами в сверхпроводящих фуллеридах при наличии примесей и ориентационного беспорядка. Получены выражения для перенормировки фононных частот и затухания.

устройств флэш-памяти. Флэш-память обеспечивает высокоскоростную работу устройств, имея при этом очень маленькие размеры. В устройстве может быть помещена память 4 Гбайт, что эквивалентно информации, хранящейся на 70 CD дисках или 40 мин DVD. Со второй половины 2003 г. Samsung планирует начать производство ДОЗУ емкостью 512 Мбит и 1 Гбит по технологии 90-нм на пластинах размером 300 мм.

Гигабитное устройство памяти — последнее достижение компании Samsung в области флэш-технологий. В среднем, емкость флэш-памяти удваивается каждый год: в 2000 г. — 256 Мбит и 512 Мбит — в 2001 г. Также в августе 2001 г. Samsung начала продажу чипов флэш-памяти емкостью 1 Гбит, изготовленных по технологии в 0,12 мкм.

При общей тенденции производителей памяти добиться уменьшения размеров и большей емкости микросхем, чип компании Samsung, кажется, появился раньше своего времени. Так, по словам главного аналитика Instar/MDR, новый чип не найдется в настоящем времени себе применения, так как сложно представить прибор, использующий флэш-технологии, которому может понадобиться объем памяти 2 Гбита. Кроме того, это довольно дорогое устройство, что также не может положительно влиять на его продвижение на рынок.

<http://www.samsung.com>

Бобринецкий И. И., Гирфанова Н. А.,
Неволин В. К., д-р физ.-мат. наук, Строганов А. А.
<http://www.miee.ru/m/projects/ntmdt/>

РФФИ СТРАНИЧКА РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1—12, 2001 г., № 1—11, 2002 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

<http://intra.rsfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Электро- и магнитооптика гетероструктур с самоорганизующимися InAs квантовыми точками

Номер проекта: 97-02-178002-а

Год предоставления отчета: 1997

В рамках проекта впервые выполнены оптические исследования самоорганизующихся InAs квантовых точек (КТ) в сильном магнитном поле и в условиях высокого давления, продолжены магнитотранспортные исследования самоорганизующихся КТ, внедренных в барьер туннельного диода. В целях верификации особенностей, которые КТ вносят в вольт-амперные характеристики, также проведены контрольные туннельно-транспортные исследования диодов со слоем доноров внутри туннельного барьера.

Одной из задач, поставленных в проекте, являлось исследование электролюминесценции из одиночных КТ. В течение 1997 г. удалось решить технологическую сторону проблемы — создать $p-i-n$ туннельный диод со слоем InAs КТ, внедренных в туннельный барьер, с оптическим окном субмикронных размеров.

- Основные полученные результаты заключаются в следующем:
- обнаружена анизотропия диамагнитного сдвига фотолюминесценции (ФЛ) из самоорганизующихся InAs КТ;
 - получена оценка пространственной протяженности волновой функции носителей, локализованных в КТ, порядка 60 Å;
 - измерен барический коэффициент для линии ФЛ из КТ, на 20 % меньший, чем для ширины запрещенной зоны в Γ -точке в объемных InAs и GaAs; это подтверждает адекватность описания электронных состояний в КТ как относящихся к Γ -долине зоны проводимости;
 - достигнуто пересечение Γ - и X-состояний (Γ -X crossover) для самоорганизующихся КТ при высоком давлении;
 - получены экспериментальные свидетельства, что в гетероструктуре "InAs КТ—GaAs матрица" для X-состояний реализуется выравнивание зон II типа;
 - независимо измерены энергии уровней электронов и дырок в InAs КТ;
 - методами туннельного транспорта через одиночную КТ измерено значение g -фактора электрона в InAs КТ;
 - в ходе контрольных исследований туннельных диодов со слоем доноров, помещенных в туннельный барьер, незави-

симо измерено расщепление X-долин, связанное с двуслойной деформацией слоя AlAs в GaAs/AlAs гетероструктурах;

- обнаружено необычное поведение магнитоосцилляций туннельного тока через диод при постоянном приложенном напряжении: ток осциллирует в противофазе с концентрацией двумерных электронов в эмиттерном аккумуляционном слое.

Кинетические свойства и теория сверхпроводимости ВТСП и фуллеренов

Номер проекта: 97-02-16705-а

Год предоставления отчета: 1997

Обсуждается система сильно взаимодействующих фермионов в твердом теле. Предложена модель для описания зависимости электронной теплоемкости от температуры во внешнем магнитном поле в области сверхпроводящего перехода. В рамках этой модели рассчитаны транспортные свойства меднооксидных сверхпроводников, которые согласуются с данными по температурной и концентрационной зависимости сопротивления в плоскости ab и вдоль оси c , а также спиновой восприимчивости в слабодопированных и оптимально допированных образцах LSCO. Теоретически описаны экспериментальные данные по фотоиндуцированной оптической проводимости в YBCO для различных уровней допирования. Обнаружено, что слабодопированные и оптимально допированные образцы описываются разным типом скейлинга, связанным с различной температурной зависимостью щели в спектре возбуждений. Получены спектры возбуждений и структура синглетных и триплетных 5-частичных состояний. Показано, что разумный выбор параметров гамильтониана приводит к малой эффективной массе локальных пар. Получено выражение для вершины взаимодействия пары с внешним полем. Несколько независимых экспериментов (туннельные эксперименты, рассеяние нейтронов при низких температурах, инфракрасное поглощение) объясняются на основе развитого формализма и единым выбором параметров гамильтониана. Предложена микроскопическая теория взаимодействия длинноволновых фононов с электронами в сверхпроводящих фуллеридах при наличии примесей и ориентационного беспорядка. Получены выражения для перенормировки фононных частот и затухания.