

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В.
Васильев В. В.
Гапонов С. В.
Каляев И. А.
Климов Д. М.
Лифшиц В. Г.
Мокеров В. Г.
Никитов С. А.
Чаплыгин Ю. А.

Редакционная коллегия:

Антонов Б. И.
Астахов М. В.
Белоус А. И.
Быков В. А.
Васильев А. А.
Волчихин В. И.
Горнев Е. С.
Градецкий В. Г.
Журавлев П. В.
Захаревич В. Г.
Кальнов В. А.
Карякин А. А.
Кузин А. Ю.
Мокров Е. А.
Норенков И. П.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросянц К. О.
Петрунин В. Ф.
Путилов А. В.
Пятышев Е. Н.
Сауров А. Н.
Сигов А. С.
Станкевич В. Г.
Старостин А. К.
Степанов Ю. И.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Безменова М. Ю.
Григорин-Рябова Е. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

От редакции 2

ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Татмышевский К. В. Механолуминесцентные (светогенерационные) сенсорные элементы для современных информационно-измерительных технологий 4
Зайцев Н. А. Микрозеркала в кремниевом кристалле 10
Мариничев В. Ю., Механцев Е. Б. Интегральный электрический микронасос 12

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

Амиров И. И., Морозов О. В., Изюмов М. О., Кальнов В. А., Орликовский А. А., Валиев К. А. Плазмохимическое травление глубоких канавок в кремнии с высоким аспектным отношением для создания элементов микромеханики 15
Бутко А. В., Веселов А. Г., Высоцкий С. Л., Кожевников А. В., Филимонов Ю. А., Никитов С. А. Исследование спин-волновых возбуждений в решетках из пермаллоевых микрочастиц 19
Старков В. В., Гаврилин Е. Ю., Вяткин А. Ф. Исследование нуклеационной стадии процесса анодного травления кремния 23

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МСТ

Новиков С. Г., Гурин Н. Т. Схемотехнические аналоги симметричных негатронов 27
Бондаренко С. Г., Векшин М. М., Кулиш О. А., Яковенко Н. А. Пространственный оптический разделитель ТЕ- и ТМ-волн на основе металлodieлектрического двухлучевого волноводного интерферометра 31

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

Кобяков И. Б., Гамкрелидзе С. А., Сперанский А. А. Трехкомпонентные векторные вибродатчики нового поколения для оперативной диагностики силовых агрегатов 35

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

Соборовер Э. И., Зубков И. Л. Плосковолноводный оптический химический сенсор для мультисенсорной системы атмосферного мониторинга 38
Пуганова Е. А., Комаров А. В., Вагин М. Ю., Карякина Е. Е., Карякин А. А. Использование микроэлектродов, модифицированных берлинской лазурью, для определения пероксида водорода в физиологических жидкостях 42

ИНФОРМАЦИЯ.

Указатель статей, опубликованных в журнале "Микросистемная техника" в 2004 г. 46
Contents 48

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России

Аннотации статей журнала на русском и английском языках и требования к оформлению статей доступны на сайте журнала: <http://www.microsystems.ru>.

ПОДПИСКА:

- по каталогу Роспечати (индекс 79493);
- по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
- в редакции журнала (тел./факс: 269-55-10)

Уважаемые читатели!

**С 2005 года наш журнал будет выходить под названием
"НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"!**

В ноябре 2004 г. журналу "Микросистемная техника" исполнилось пять лет. Первый номер журнала вышел в ноябре 1999 г., а с 2001 г. он выходит ежемесячно (12 номеров в год). Журнал включен в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России с апреля 2003 г.

Междисциплинарный теоретический и прикладной научно-технический журнал "Микросистемная техника" освещает современное состояние, перспективы и тенденции развития микросистемной техники (МСТ), рассматривает вопросы разработки и внедрения микросистем в различные области науки и техники, технологии и производства.

Наступивший XXI век ознаменовал новое направление в развитии кремниевой технологии, основанное на использовании не только планарных свойств, но и объемных конструктивных свойств кремниевых элементов при создании нового поколения устройств, приборов и механизмов повышенной сложности, применяемых в радиотехнике, оптике, машиностроении, приборостроении, химии и биомедицине. Это научно-техническое направление дало основу для развития "микросистемной техники" ("microsystems engineering" — MSE) на базе "технологии микросистем" ("microsystems technology" — MST) и микроэлектромеханических систем ("microelectromechanical systems" — MEMS).

В России термин "микросистемная техника" стал использоваться в официальных документах после принятия в 1996 г. Перечня критических технологий Федерального уровня. В приоритетные направления развития науки и техники Российской Федерации на 2001—2010 гг. (раздел производственных технологий) в состав критических технологий Федерального уровня включена микросистемная техника.

Постановлением Президиума Российской академии наук от 1 июля 2003 г. № 233 утверждены "Основные направления фундаментальных исследований", включающие в разделе "Информатика" пункт 3.7 "Элементная база микроэлектроники, наноэлектроники и квантовых компьютеров. Материалы для микро- и наноэлектроники. Микросистемная техника". С мая 2003 г. наш журнал вы-

пускается под научно-методическим руководством Отделения информационных технологий и вычислительных систем РАН.

В настоящее время можно использовать существующую российскую микроэлектронную технологию с небольшой модернизацией для разработки микросистемной техники, отнесенной в странах с высоким научно-техническим уровнем к "критическим" и характеризующую высоким динамичным развитием с начала 90-х годов. Дальнейшее развитие работ связано с переходом от технологических приемов микроэлектроники к нанотехнологии.

Развитие нанотехнологий было стимулировано разработкой полупроводниковых наноструктур, выращиваемых методами молекулярно-пучковой и металлоорганической эпитаксии, и созданием на их основе принципиально новых приборов и устройств электроники и оптоэлектроники, широко используемых уже сейчас в системах хранения, передачи и обработки информации (лазеры на квантовых ямах и сверхрешетках, СВЧ-транзисторы с двумерным электронным газом и др.).

Мощным толчком развития нанотехнологий послужило открытие в 80-х годах XX века туннельной микроскопии, идеи которой легли в основу разработки широкого спектра современных зондовых методов диагностики материалов на наноуровне (10^{-9} м), а также ряда технологических приемов (нанолитография, молекулярная сборка).

К настоящему времени существенно усовершенствованы известные и разработаны новейшие технологии (самоорганизация и самосборка, электронная и рентгеновская литография, техника сфокусированных ионных пучков) и диагностические методы (электронная микроскопия сверхвысокого разрешения, сканирующая зондовая микроскопия, рентгеновские методы, в том числе с использованием синхротронного излучения, фемтосекундная спектроскопия), что позволяет контролируемым образом создавать наноструктуры, наноматериалы и устройства различного назначения на их основе. В частности, крупные успехи достигнуты в создании новых углеродных материалов с уникальными свойствами (фуллерены, нанотрубки) и конст-рук-

ционных наноматериалов с рекордными эксплуатационными характеристиками.

В настоящее время стартовые позиции в области нанотехнологий и наноматериалов развитых стран, включая Россию, приблизительно равны. В развитых странах осознание ключевой роли, которую уже в недалеком будущем будут играть нанотехнологии, привело к разработке широкомасштабных программ по их развитию на основе государственной поддержки. В настоящее время в России разрабатывается аналогичная Концепция в области нанотехнологии, в которой используются следующие термины:

- *"нанотехнология"* — совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм хотя бы в одном измерении и в результате этого приобретающие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба; в более широком смысле этот термин охватывает также методы диагностики, характеристики и исследований таких объектов;
- *"наноматериал"* — материал, содержащий структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающий качественно новыми свойствами, в том числе заданными функциональными и эксплуатационными характеристиками;
- *"наносистемная техника"* — созданные полностью или частично на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям.

Учитывая расширившийся круг разработок и возросший интерес к микро- и наносистемной технике (МНСТ), в журнале на 2005 г. запланировано увеличение объема и направлений, входящих в основные рубрики:

- Элементы микро- и наносистемной техники.
- Материаловедческие и технологические основы МНСТ.
- Конструирование и моделирование МНСТ.
- Нанотехнологии и зондовая микроскопия.
- Молекулярная электроника и биоэлектроника.
- Применение МНСТ.
- Системы на кристалле.
- Страничка Российского фонда фундаментальных исследований.
- Информация.

Значительную роль в развитии микросистемной техники внесло Министерство образования Российской Федерации, открывшее в 2000 г. подготовку инженеров по новой специальности — 201900 "Микросистемная техника" в рамках Направления подготовки дипломированного специалиста 654100 — Электроника и микроэлектроника (приказ от 02 марта 2000 г. № 686), а с 2003 г. — подготовку по направлению 658300 "Нанотехнология". В настоящее время несколько институтов России начали подготовку инженеров по этим специальностям.

За последние два-три года в России значительно увеличился интерес к развитию микросистемной техники. На это указывает как резко возросшее число конкурсов на постановку новых разработок изделий микросистемной техники, так и увеличившееся (на один-два порядка величины) посещение сайта нашего журнала в Интернете (<http://www.microsystems.ru>). Расширится распространение электронной версии журнала на лазерном диске, охватывающей период 1999—2003 годы (тел. 269-55-10).

Уважаемые читатели и авторы журнала, приглашаем вас к активному сотрудничеству!

*Главный редактор
Петр Мальцев*

УДК 531.787

К. В. Татмышевский, канд. техн. наук,
Владимирский государственный университет

МЕХАНОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ (СВЕТОГЕНЕРАЦИОННЫЕ) СЕНСОРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрены физические основы работы и математическая модель механолюминесцентных сенсоров давления, изготовленных на основе соединений сульфида цинка. Приведены результаты расчетов выходных оптических сигналов сенсорных элементов.

Эффективность применения современных технических систем в значительной степени определяется работой сенсорных устройств, поставляющих первичную информацию о состоянии самой системы и внешних, воздействующих на нее факторов. Расширение диапазонов условий применения изделий предъявляет к сенсорным элементам (СЭ) особые требования по устойчивости к электромагнитным помехам, быстродействию, надежности, информативности, избирательности, миниатюрности и возможности интегрирования в конструкцию изделия.

Механолюминесцентные сенсорные элементы (МЛСЭ) отвечают многим из предъявляемых требований. Такие СЭ работают по принципу прямого преобразования механической энергии упругопластической деформации в энергию оптического излучения. Здесь использование выходных световых сигналов решает задачи сопряжения сенсоров с волоконными линиями связи и задачи повышения помехоустойчивости к электромагнитным помехам; отсутствие движущихся частей, твердотельность и планарность сенсора обеспечивают надежность, а использование помимо амплитудно-временных параметров оптического сигнала его пространственной модуляции, различных спектров и состояния поляризации повышает информативность.

МЛСЭ используют в своей работе явление люминесценции полупроводников класса A_2B_6 , возникающей при пластическом деформировании кристаллов полупроводника. Конструктивно механолюминесцентный сенсор представляет собой тонкослойный элемент, в состав которого входит мелкодисперсный порошок люминофора и прозрачный связующий материал (рис. 1). Оптималь-

ная толщина сенсорного элемента не превышает 20...100 мкм, что определяется гранулометрическим составом порошка и особенностями распространения света в мелкодисперсных слоях. Малая толщина механолюминесцентных сенсоров позволяет изготавливать миниатюрные гибкие пленочные конструкции, которые можно встраивать в различные элементы мехатронных систем, подвергающиеся внешним механическим воздействиям. Самым миниатюрным МЛСЭ может быть одна частица люминофора, имеющая средний линейный размер 1...10 мкм [1].

Связь между МЛСЭ и блоком обработки информации осуществляется с помощью оптических волокон или через открытое оптическое пространство. Обобщенная структурная схема, детализирующая процесс преобразования энергии в информационной цепи с МЛСЭ, показана на рис. 2. Схема соответствует структуре оптопары и включает МЛСЭ (излучатель), фотоприемник (ФП) и оптический канал связи между ними. Здесь на входе СЭ действует давление $\sigma(t)$, вызывающее пластическую деформацию кристаллов люминофора. При деформировании люминофор генерирует световой импульс $\Phi(t)$.

Можно выделить три основных варианта конструкции МЛСЭ в зависимости от их пространственно-геометрических параметров. МЛСЭ сосредоточенного типа имеет площадь СЭ, приблизительно равную площади ФП. Здесь неравномерность распределения давления по площади сенсора можно не учитывать. В качестве подложки сенсора могут использоваться полимерная пленка, оптическая керамика, компоненты обычной и волоконной оптики. Сосредоточенный МЛСЭ может быть нанесен непосредственно на торец волоконного световода (жгута или кабеля), как показано на рис. 1.

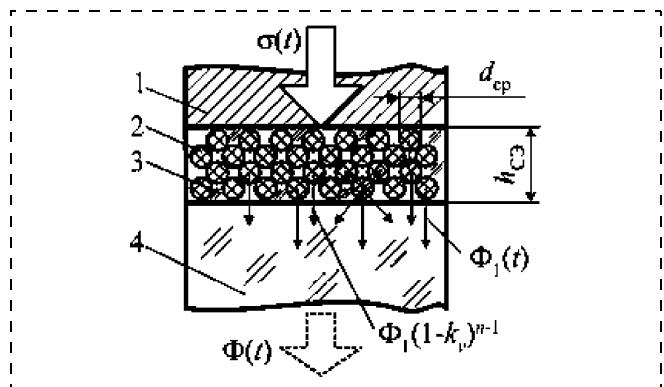
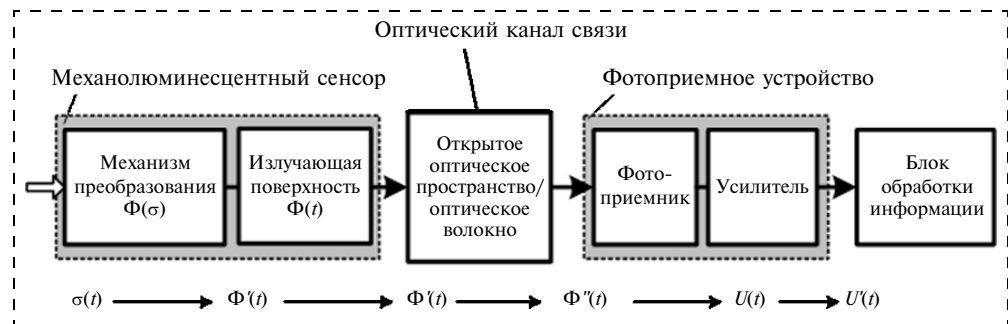


Рис. 1. Конструкция МЛСЭ:

1 — элемент передачи давления; 2 — частицы люминофора; 3 — прозрачный связующий материал; 4 — прозрачная подложка (волоконный жгут, кабель и т. п.)

Рис. 2. Обобщенная структурная схема преобразования энергии в оптоэлектронной информационной цепи с МЛСЭ



Информативными признаками сигнала сосредоточенного МЛСЭ являются его амплитудно-временные параметры. Такие СЭ могут успешно использоваться в составе микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС).

МЛСЭ распределенного типа имеет площадь сенсорного элемента, значительно превышающую площадь входного окна ФП. Сенсор может быть распределен как по площади, так и по длине, например, волоконного световода. В этом случае либо при изготовлении в оптическое стекло добавляются люминесцентный порошок, либо на готовое волокно специальным образом наносят дополнительное механолуминесцентное покрытие. МЛСЭ с распределенным по площади сенсором реализует функцию визуализации полей давлений и обладает свойством тактильной чувствительности. Такой сенсор может быть изготовлен в виде тонкой гибкой пленки, панели или оболочки произвольной формы. Выходной сигнал такого датчика имеет модуляцию не только во времени, но и в пространстве. Это свойство позволяет воспроизводить в виде световых образов процессы контактного механического взаимодействия сложноконтурных объектов с распределенным сенсорным элементом. Выходные сигналы распределенных МЛСЭ необходимо регистрировать матричными ФП.

Третий вариант конструктивного исполнения МЛСЭ можно назвать встроенным или интегрированным в конструкцию изделия. Здесь СЭ (механолуминесцентный материал) распределен в объеме несущих элементов конструкций, например, изготовленных из непрозрачных композиционных материалов. Световой сигнал от единичных СЭ может передаваться по армирующим кварцевым волокнам самого композита к центральному регистрирующему устройству. Для этого волокна располагаются в конструкции определенным образом. Использование в разных конструкциях сенсоров, имеющих разные оптические спектры генерируемого сигнала, позволяет определять место механического воздействия. По амплитуде и длительности светового импульса можно судить о силе воздействия и степени разрушения композитной конструкции. Такие элементы конструкций приобретают

свойство самодиагностики при воздействии на них периодических ударных воздействий. Особенности механических свойств композиционных материалов требуют проведения мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций, работающих в условиях интенсивных механических воздействий [2].

Успешное применение МЛСЭ невозможно без разработки физической и математической моделей, проведения имитационного математического моделирования и проверки адекватности моделей путем экспериментальных исследований макетных образцов сенсорных элементов.

Люминесценция как физическое явление обусловлена способностью светящихся веществ (люминофоров) трансформировать тот или иной вид энергии в видимый свет или, реже, в ультрафиолетовое или инфракрасное излучение. Способностью к механолуминесценции обладают различные материалы, имеющие в основном кристаллическую структуру. Треть всех твердых тел обладает способностью к механолуминесценции, хотя в большинстве случаев излучение очень слабо и может наблюдаться адаптированным глазом лишь в полной темноте.

В обширном классе веществ, обладающих способностью к люминесценции вообще и к механолуминесценции (МЛ) в частности, особое место занимают вещества, объединенные под общим названием "кристаллофосфоры" (КФ). По своим свойствам КФ относятся к полупроводникам класса A_2B_6 с широкой запрещенной зоной и являются диэлектриками с высоким удельным сопротивлением. Люминесценция КФ возникает благодаря присутствию малого количества примесей других веществ, называемых активаторами. Основное вещество, за некоторыми исключениями, люминесцентными свойствами не обладает [2]. Наиболее яркое свечение имеют халькогенидные кристаллофосфоры (ZnS , CdS , $ZnSe$, Zn_2SiO_4 , $CaWO_4$). Свойство механолуминесценции отмечено также у щелочно-галоидных кристаллов (LiF , KBr , NaF , KCl), металлов (Cu , Fe), органических соединений (сахар, лед, нафталин, антрацен), и прочих ($SrAl_2O_4 : Eu$, $BaAl_2Si_2O_8 : Yb$, $Cs_2[Pt(CN)_4] \cdot H_2O$, SiC , $MgAl_2O_4$, $Y_2O_3 : Eu$, $UO_2(NO_3) \cdot 6H_2O$) [4].

Одной из групп КФ являются цинк-сульфидные соединения, обладающие наибольшей яркостью свечения. Именно по этой причине на ZnS-фосфорах проводится подавляющее большинство исследований механолюминисценции. Для придания чистому сульфиду цинка люминесцентных свойств в него вводят различные примеси (активаторы), определяющие спектр излучения, время после свечения и способность к люминесценции. Акт излучения происходит в субмикроскопических образованиях, связанных с атомами активатора и называемых центрами свечения (ЦС).

Показано [5], что механолюминесценция в соединениях A_2B_6 является следствием процессов движения дислокаций, сопровождающих пластическую деформацию кристаллов. Экспериментально обнаружено, что дислокации в полупроводниках A_2B_6 , и в частности ZnS, обладают сильным электрическим зарядом. В процессе пластической деформации происходит взаимодействие ЦС с электрическим полем движущихся заряженных дислокаций, которое приводит к возбуждению (ионизации) ЦС с их последующими излучательными переходами. Сильный заряд дислокаций обусловлен большой долей ионной составляющей в силах связи атомов основания ZnS.

По мере приближения ядра дислокации к ЦС он перемещается на более высокий энергетический уровень. Как только произойдет сближение и перекрытие основных электронных уровней со свободными уровнями ЦС или с зоной проводимости, становятся существующими процессы туннелирования электронов с занятыми уровнями на свободные и в зону проводимости. Так как скорость туннелирования электрона велика по сравнению со скоростью движения дислокации, то можно считать, что в момент туннелирования ЦС удален от ядра дислокации на фиксированное расстояние $r_{ЦС}$, а туннелирование происходит в постоянном электрическом поле E_D цилиндра пространственного заряда дислокации [6]. Напряженность однородного электрического поля, которая обеспечивает туннелирование электрона с заданной вероятностью, описывается зависимостью

$$E_D = \left\{ \frac{4\sqrt{2}P_T G_d^2 E_{ПБ}^3 m_*^2}{e^4 \hbar^3 (1 - \Delta/E_{ПБ})^{0,5}} \exp \left[\frac{(E_{ПБ} - \Delta)^2}{4G_d^2} \right] \right\}^{\frac{1}{4}}, \quad (1)$$

$$G_d^2 = \begin{cases} 2\Delta T & \text{при } k_B T > \hbar\omega; \\ \frac{\Delta\hbar\omega}{2} \left[1 + \frac{2\pi^2}{3} \left(\frac{T}{\hbar\omega} \right)^2 \right] & \text{при } \sqrt{8m_* C_l E_{ПБ}} < k_B T < \hbar\omega; \end{cases}$$

$$\Delta = \frac{3\pi^2 E_{ПБ}}{2} \frac{m_*}{M_{яч}} \left(\frac{\Omega_{3П}}{\hbar\omega} \right)^2,$$

где e — заряд электрона; $\hbar$ — постоянная Планка; Δ — параметр, характеризующий энергию поляризации кристаллической решетки; $E_{ПБ}$ — энергия потенциального барьера, отсчитываемая либо от дна зоны проводимости, либо от неравновесного возбужденного уровня до его основного невозбужденного уровня; G_d^2 — параметр, характеризующий дисперсию энергии электрона; m_* — эффективная масса электрона; k_B — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; $\hbar\omega$ — дебаевская энергия фонона; C_l — скорость распространения продольных упругих волн в кристалле; $M_{яч}$ — масса элементарной ячейки кристалла. Здесь следует учитывать, что вероятность туннелирования имеет размерность c^{-1} (секунда в минус первой степени).

Возвращение возбужденного ЦС в исходное состояние сопровождается излучением кванта света. Математическая модель МЛСЭ представляет собой систему интегро-дифференциальных уравнений, основой которой является уравнение светового потока люминесценции $\Phi(t)$ как функции времени:

$$\begin{cases} \Phi(t) = 2N_{ЦС} \frac{\eta}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \int_0^{t_\sigma} r_{вз}(t) \tilde{N}_{mD}(t) \tilde{U}_D(t) dt; & (2) \\ \tilde{N}_{mD}(t) \tilde{U}_D(t) = \frac{3}{4} \frac{\dot{\varepsilon}_1^p}{|\dot{b}|}; & (3) \end{cases}$$

с замыкающими зависимостями

$$N_{ЦС} = C_{ЦС}^V V; \quad (4)$$

$$r_{вз} = \left[\frac{\pi r_{ЦС}^4 P_T(r_{ЦС})}{2\tilde{U}_D} \right]^{\frac{1}{3}}; \quad (5)$$

$$r_{ЦС} = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 E_D}; \quad (6)$$

$$\tilde{U}_D = k_S C_{tr} \exp\left(-\frac{Df}{\sigma_1}\right),$$

$$\text{где } k_S = \begin{cases} 0, & \text{если } \sigma_1 < \sigma_S; \\ 1 - 2 \frac{\exp[0,5(\sigma_S - \sigma_1)]}{\sigma_1 - \sigma_S}, & \text{если } \sigma_1 > \sigma_S; \end{cases} \quad (7)$$

$$\sigma_1 = \sigma(t) - E\varepsilon_1^p; \quad (8)$$

$$\tilde{N}_{mD}(t) = \left(\tilde{N}_{tD}^0 + \frac{3}{4} M\varepsilon_1^p \right) \exp\left(-\frac{\tilde{N}_{tD}^0 + \frac{3}{4} M\varepsilon_1^p}{\tilde{N}_{ткр}}\right), \quad (9)$$

где $N_{\text{ЦС}}$ — общее число ЦС в люминесцентном материале СЭ; η — энергия кванта света; τ — время жизни возбужденного состояния; t_{σ} — длительность возбуждения ЦС импульсом давления $\sigma(t)$; $r_{\text{вз}}$ — радиус взаимодействия дислокации с ЦС; $\tilde{N}_{mD}$ — средняя плотность подвижных дислокаций; $\tilde{U}_D$ — скорость движения дислокаций, усредненная по дислокационному массиву; $|\mathbf{b}|$ — модуль вектора Бюргерса, характеризующий область искажения кристаллической решетки дислокацией определенного типа; $\dot{\varepsilon}_1^P$ — скорость роста пластических деформаций; $C_{\text{ЦС}}^V$ — объемная концентрация ЦС; V — суммарный объем зерен кристалла; $r_{\text{ЦС}}$ — текущее расстояние от ядра дислокации до ЦС; P_T — вероятность туннелирования электрона в однородном электрическом поле; q — линейная плотность заряда дислокации; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; ε — относительная диэлектрическая проницаемость; E_D — напряженность радиального электрического поля движущейся дислокации; k_S — поправочный коэффициент; C_{tr} — скорость распространения сдвиговых волн в кристалле; D_f — эффективное напряжение внутреннего трения (сопротивление движению дислокации внутри кристалла); σ_1 — главное значение тензора напряжения; σ_S — статический предел текучести; E — модуль упругости; M — коэффициент размножения дислокаций; $\tilde{N}_{tD}$ — общая плотность дислокаций; $\tilde{N}_{tкр}$ — критическая плотность дислокаций; t — текущее время.

Здесь интенсивность МЛ определяется числом квантов света в единицу времени и описывается формулой (2). Объем кристалла, в котором выполняется условие возбуждения ЦС, определяется подынтегральным выражением в формуле (2). Объем кристалла, который полностью обметается движущимися дислокациями, определяется выражением (3).

Общее количество ЦС, содержащихся в люминофоре СЭ, определяет суммарный световой поток и находится по формуле (4). Формула (5) определяет радиус взаимодействия ЦС и дислокации с учетом того, что при увеличении скорости движения изменяется конфигурация цилиндра пространственного дислокационного заряда. Напряженность электрического поля, при которой происходит гарантированное туннелирование ($P_T = 1$), определяется по формуле (1). С увеличением скорости цилиндр теряет симметрию и принимает форму вытянутого эллипса. Выражение (6) определяет текущее расстояние от ядра дислокации до ЦС.

Формула (7) позволяет рассчитать среднюю скорость движения дислокационного ансамбля в зависимости от приложенного давления. Здесь по-

правочный коэффициент k_S корректирует значение скорости с учетом существования порогового значения напряжения текучести, ниже которого движение дислокаций практически не происходит [6]. Уравнение (8) определяет главное значение тензора напряжения для одноосного деформированного состояния. Здесь показано, что напряжение растет за счет общей деформации и релаксирует за счет пластической деформации.

Выражение (9) определяет плотность подвижных дислокаций как долю от общей плотности дислокаций с учетом их размножения и запираания. Здесь задача расчета кинетики пластического деформирования для случая квазистатического одноосного нагружения решается на основе микроскопической модели изотропной упругопластической среды с упрочнением, согласно которой пластическая деформация рассматривается как результат движения и размножения дислокаций [7, 8].

Оптические параметры МЛСЭ, определяющие перенос излучения в нем, в первую очередь, зависят от его внутренней структуры. Наиболее существенным параметром МЛСЭ является его толщина. Толщина слоя, объемная концентрация частиц порошка в нем и весовая концентрация легирующей примеси, создающей ЦС, определяют общее число $N_{\text{ЦС}}$, принимающих участие в процессе излучения. Условно можно считать отдельные частицы люминофора шарами одинакового диаметра, равномерно расположенными по поверхности подложки и не перекрывающимися друг друга. Назовем такой однородный слой частиц монослоем. Для слоя из $n_{\text{сл}}$ таких слоев коэффициент объемной упаковки k_V , равный отношению объемов всех частиц к объему слоя, ограничен значением 0,86.

Общий поток излучения МЛСЭ возрастает с увеличением количества частиц в монослое и с увеличением числа монослоев, однако возрастание потока достигает насыщения, поскольку при достаточно большом числе монослоев свечение глубоко лежащих слоев полностью рассеивается вышележащими слоями. Прозрачность отдельного монослоя можно принять равной $(1 - k_V)$. Таким образом, предполагается, что отдельная частица пропускает только свое излучение и является непрозрачной для излучения нижележащих частиц, а излучение проходит только в промежутках между частицами [10]. Обозначая поток излучения самого ближнего к подложке монослоя $\Phi_1(t)$, определяем суммарный поток от сенсорного элемента толщиной $h_{\text{СЭ}}$:

$$\begin{aligned} \Phi &= \Phi_1 + (1 - k_V)\Phi_1 + (1 - k_V)^2\Phi_1 + \dots + \\ &+ (1 - k_V)^{n_{\text{сл}}-1}\Phi_1 = \Phi_1 \left[1 + \sum_{i=1}^{n_{\text{сл}}} (1 - k_V)^i \right] = \\ &= \Phi_1 k_n, \end{aligned} \quad (10)$$

где $n_{\text{сл}} = h_{\text{СЭ}}/d_{\text{ср}}$; $d_{\text{ср}}$ — средний диаметр частиц порошка МЛМ; i — число слоев кроме первого; k_n — коэффициент неравномерности свечения. Эта формула позволяет привести суммарный поток излучения $\Phi(t)$ к потоку первого монослоя $\Phi_1(t)$, а неравномерность вклада остальных слоев в суммарный поток учесть с помощью коэффициента неравномерности свечения k_n . Анализ формулы (10) показывает, что оптимальное число слоев — $n_{\text{сл}} \approx 3 \dots 6$, так как дальнейшее их увеличение даст прирост светового потока не более 5 %.

Отдельный монослой МЛСЭ излучает поток в пределах полного телесного угла. При этом в направлении фотоприемника выходит только половина полного потока, вторая половина рассеивается нижележащими слоями и в ФП не попадает. Это обстоятельство должно быть учтено дополнительным коэффициентом $k_{\Omega} = 0,5$. Потери излучения, возникающие при вводе излучения МЛСЭ в оптический канал связи, должны учитываться дополнительным коэффициентом ввода излучения $k_{\text{в}}$. Таким образом, учитывая конструктивные параметры и внутреннюю структуру СЭ, значение полного потока излучения, выводимого с площадки СЭ в оптический канал, можно найти как

$$\Phi(t) = 0,5k_{\text{в}}k_n\Phi_1(t).$$

Расчеты светового потока, генерируемого МЛСЭ при различных импульсных механических воздействиях, выполнены в среде MatLab. В программе определяются квантово-механические, электрические и кинетические характеристики механолюминесцентного материала на основе промышленного электролюминофора ЭЛС-580 (состав ZnS:Mn, Cu ; весовое содержание марганца 1 %). В расчетах учитывалась только энергия квантов излучения, соответствующих максимуму спектра излучения марганцевых ЦС ($\lambda = 580$ нм; $\eta = 2,2$ эВ), так как интенсивность излучения медных ЦС приблизительно в 50 раз слабее. Кинетические параметры материала люминофора были определены с учетом технологии производства люминесцентных порошков. В проведенных расчетах принимались значения $k_{\text{в}} = 1$, $n_{\text{сл}} = 2$, $d_{\text{ср}} = 10$ мкм, $k_V = 0,6$, $k_n = 1,4$. Эти значения соответствуют изготовленным опытным образцам МЛСЭ.

Кинетика затухания свечения соответствует внутрицентральной люминесценции [3], характерной для ZnS:Mn с постоянной времени $\tau = 150$ мкс. Следует отметить, что экспериментальное сравнение чувствительности различных промышленных электролюминофоров к механическому возбуждению показало, что наибольшей чувствительностью обладает именно люминофор ЭЛС-580.

Проводился расчет энергетической светимости сенсора $R(t)$, т. е. вычислялось значение потока, излучаемого сенсорным элементом с единичной

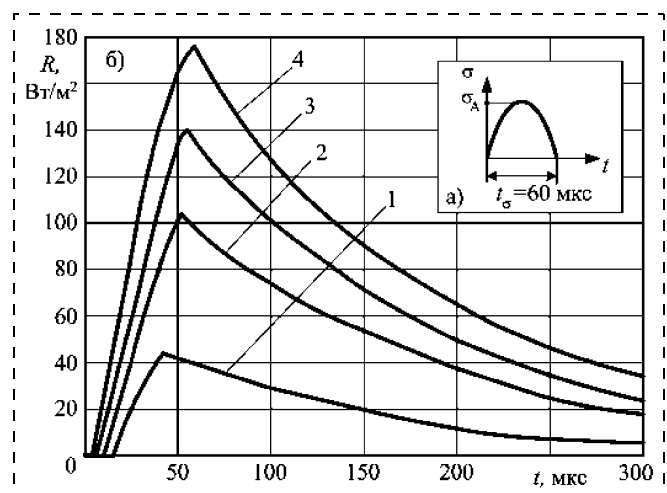


Рис. 3. Расчетные зависимости энергетической светимости МЛСЭ при воздействии импульсов давления одинаковой длительности и различной амплитуды:

а — параметры импульса давления; б — светимость МЛСЭ; 1 — $\sigma_A = 60$ МПа; 2 — $\sigma_A = 120$ МПа; 3 — $\sigma_A = 200$ МПа; 4 — $\sigma_A = 340$ МПа

площадью поверхности, равной 1 м^2 . Входное воздействие в расчетах описывается одиночным импульсом давления $\sigma(t)$. Результаты расчетов энергетической светимости МЛСЭ при различных входных давлениях приведены на рис. 3–5. Достоинством методики расчета является определение выходного оптического сигнала в абсолютных единицах энергетической светимости, пригодных для расчета схемы включения ФП.

Анализ выходных оптических сигналов МЛСЭ показывает, что амплитуда и длительность световых импульсов существенно зависят не только от амплитуды, но и от длительности импульсов давления. При уменьшении амплитуды и крутизны волны давления наблюдается временная задержка

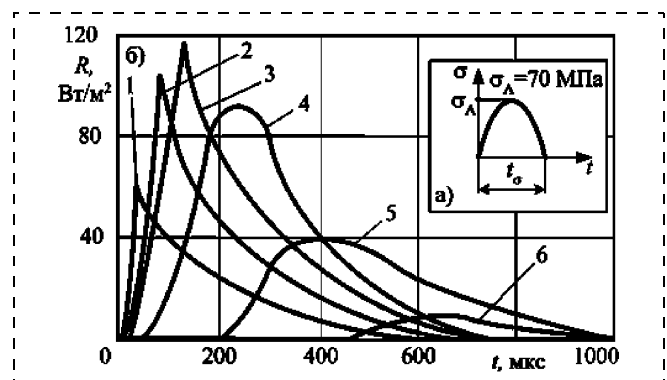


Рис. 4. Расчетные зависимости энергетической светимости МЛСЭ при воздействии импульсов давления одинаковой амплитуды и различной длительности:

а — параметры импульса давления; б — светимость МЛСЭ; 1 — $t_{\sigma} = 60$ мкс; 2 — $t_{\sigma} = 120$ мкс; 3 — $t_{\sigma} = 400$ МПа; 4 — $t_{\sigma} = 340$ МПа; 5 — $t_{\sigma} = 1000$ мкс; 6 — $t_{\sigma} = 2000$ мкс

в появлении излучения, которая определяется временем достижения давления, равного пределу текучести материала сенсора (см. рис. 3). Это подчеркивает пороговый характер функции преобразования МЛСЭ. То есть в пределах упругих деформаций генерации излучения практически не происходит. Наблюдается временной сдвиг между максимумом давления и максимумом излучения, причем значение сдвига растет с увеличением продолжительности нагружения (см. рис. 4). Это объясняется тем, что фактически одновременно протекают два конкурирующих процесса. В первом процессе с разной скоростью может происходить накопление возбужденных ЦС. Скорость их накопления зависит преимущественно от скорости нарастания давления. Второй процесс имеет постоянную скорость перехода возбужденных ЦС в исходное состояние и определяется экспоненциальным сомножителем в формуле (1). Соответственно, если скорость возбуждения много больше скорости возврата, то будет наблюдаться интенсивное излучение с крутым фронтом нарастания. В противном случае концентрации возбужденных ЦС не хватит, чтобы появилось заметное излучение, хотя полная деформация МЛСЭ может быть значительно больше, чем в первом случае.

Так, в области длительностей импульса давления $\sigma(t)$ от 20 до 250 мкс (см. рис. 5) с увеличением длительности воздействия наблюдается увеличение амплитудного значения светимости R_A пропорционально $\lg(t_\sigma)$. В диапазоне $t_\sigma \approx 150 \dots 250$ мкс графики имеют перегиб и при дальнейшем увеличении длительности импульса амплитуда светимости уменьшается. Длительность импульса давления в точке перегиба обеспечивает превышение воздействием $\sigma(t)$ предела текучести приблизительно на время, равное τ . Падение светимости после точки перегиба также приблизительно прямо пропорционально $\lg(t_\sigma)$.

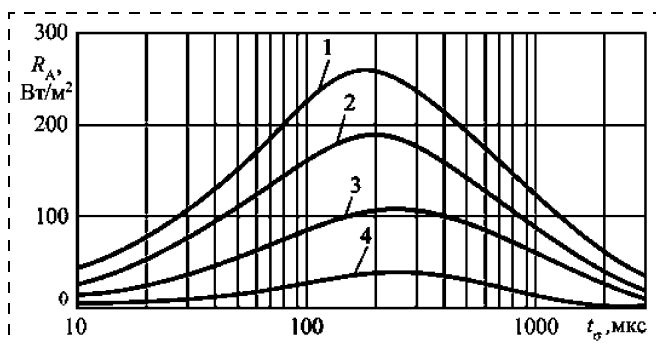


Рис. 5. Расчетные зависимости амплитудного значения энергетической светимости МЛСЭ от длительности импульса давления полусинусоидальной формы:

1 — $\sigma_A = 50$ МПа; 2 — $\sigma_A = 80$ МПа; 3 — $\sigma_A = 160$ МПа; 4 — $\sigma_A = 320$ МПа

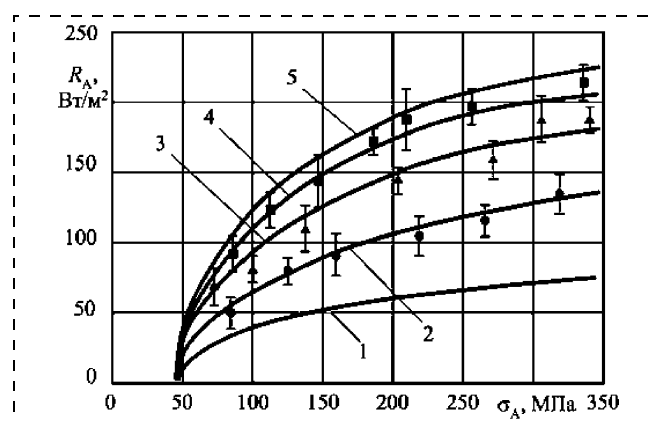


Рис. 6. Зависимость амплитуды импульса энергетической светимости от амплитуды импульса давления различной длительности: 1 — $t_\sigma = 20$ мкс; 2 — $t_\sigma = 40$ мкс; 3 — $t_\sigma = 60$ мкс; 4 — $t_\sigma = 80$ мкс; 5 — $t_\sigma = 100$ мкс; точками показаны экспериментальные результаты

Длительность оптического сигнала МЛСЭ на восходящей ветви практически во всех случаях в несколько раз больше длительности t_σ . На нисходящей ветви длительность свечения значительно уменьшается. Снижение амплитуды и длительности излучения с ростом t_σ объясняет отсутствие излучения при статическом воздействии. Ход процессов возбуждения ЦС в этом случае не изменяется, однако нарушение условия накопления возбужденных ЦС приводит к сильному снижению интенсивности излучения за счет увеличения его продолжительности.

Это подчеркивает существенные динамические свойства МЛСЭ и сложность определения коэффициента преобразования сенсора в целом. Для оценки применимости МЛСЭ следует сначала рассчитать реакцию сенсора на возможные предельные значения входного механического воздействия, а далее оценить возможность использования полученных реализаций для последующей регистрации конкретной аппаратурой.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что отклонения расчетных значений от экспериментальных не превосходят 10 % (рис. 6). Это доказывает адекватность и применимость разработанной математической модели МЛСЭ.

Выводы

1. Разработана математическая модель МЛСЭ на основе цинк-сульфидных кристаллофосфоров. Модель основывается на четкой трактовке физических процессов, приводящих к механолоуминесценции. Разработанная методика расчета выходных оптических сигналов МЛСЭ позволяет определять значения сигнала в абсолютных единицах

измерения светового потока. Модель учитывает особенности конструкции МЛСЭ.

2. Результаты расчетов показывают, что, во-первых, функция преобразования МЛСЭ имеет явно выраженный порог чувствительности, во-вторых, функция преобразования имеет существенно нелинейный характер, в-третьих, форма выходных оптических сигналов значительно отличается от формы входных импульсов давления.

3. Модель позволяет рассчитывать процессы изменения плотности дислокаций при механических воздействиях на любые полупроводники с учетом предыстории и длительности напряженно-деформированного состояния.

4. Сопоставление полученных результатов с данными современных полупроводниковых ФП [11] показало, что даже с учетом потерь мощности излучения в оптическом канале возможно надежное детектирование оптического сигнала МЛСЭ с целью дальнейшей обработки.

Список литературы

1. Люминесцентные материалы и химические вещества. Каталог. Черкассы: НИИТЭХИМ, 1983. 204 с.
2. Sage I., Humberstone L., Oswald I., Lloyd P., Bourhill G. Getting light through black composites: embedded triboluminescent structural damage sensors // Smart Mater. Struct. 2001. N 10. P. 332—337.
3. Гурвич А. М. Введение в физическую химию кристаллофосфоров. М.: Высшая школа, 1982. 376 с.
4. Chandra B. P., Khan M. S., Ansari M. H. Cleavage mechanoluminescence in crystals // Cryst. Res. Technol. 1998. N 2. P. 291—302.
5. Электронные свойства дислокаций в полупроводниках / Под ред. Ю. А. Осипьяна. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 320 с.
6. Валиев З. А., Шикин В. Б. О движении заряженных дислокаций в полупроводниках A_2B_6 // Физика твердого тела. 1985. № 9. Т. 27. С. 2683—2686.
7. Нигматулин Р. И., Холин Н. Н. К модели упругопластической среды с дислокационной кинетикой пластического деформирования // Механика твердого тела. 1974. № 4. С. 131—146.
8. Гилман Дж. Микродинамическая теория пластичности // Микропластичность. М.: Металлургия, 1972. С. 18—37.
9. Тейлор Дж. Динамика дислокаций и динамическая текучесть // Механика. 1966. № 4. С. 145—152.
10. Прикладная электролюминесценция / Под ред. М. В. Фока. М.: Сов. радио, 1974. 416 с.
11. Юшин А. М. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги: Справочник. Т. 3. М.: ИП РадиоСофт, 2000. 512 с.

УДК 621.3.049.76

Н. А. Зайцев, д-р техн. наук,
ОАО "НИИМЭ и Микрон"

МИКРОЗЕРКАЛА В КРЕМНИЕВОМ КРИСТАЛЛЕ

Рассматриваются вопросы создания поворачивающегося зеркала в кремниевом кристалле.

Характерной чертой мирового развития последнего десятилетия в области технологии микросистемной техники (МСТ) является интеграция электроники, механики и оптики. К основным потребителям изделий микроопто-электромеханических систем (МОЭМС) относятся изготовители различных модуляторов оп-

тического излучения и каналов оптоволоконной связи с коммутаторами на микрозеркалах.

Поворачивающееся микрозеркало в кремниевом кристалле создано на предприятии ОАО "НИИМЭ и Микрон" на основе микроэлектронного производства трехмерных МОЭМС. Анализ конструкции позволил опреде-

лить базовый состав компонентов, из которых формируется большинство этих приборов. С целью сокращения сроков разработки и отработки технологических маршрутов изготовления данных приборов был определен базовый перечень компонентов, из которых как из кирпичиков изготавливают МОЭМС.

Узел микрозеркала состоит из следующих основных компонентов:

- микропетли — конструкционный элемент, с помощью которого соединяются конструкции прибора, лежащие в

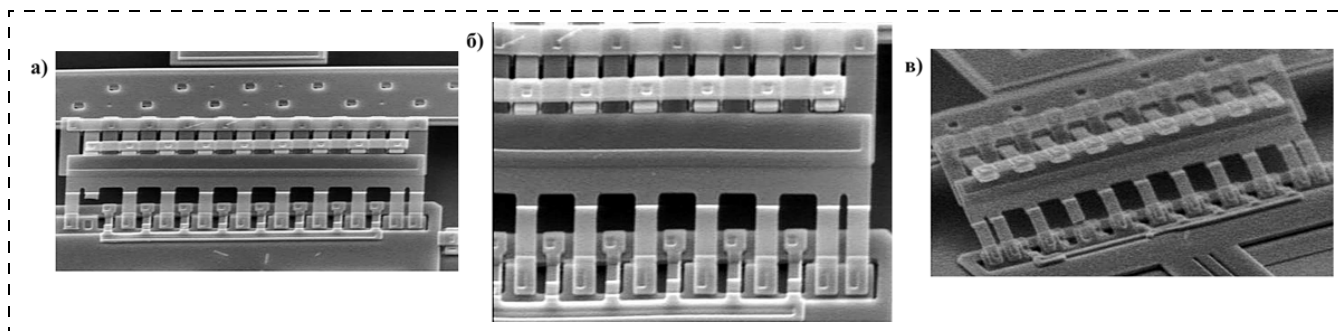


Рис. 1. Микропетли

плоскости или на пластине (рис. 1, а, б, в);

- актюатора, осуществляющего отрыв подвижной части конструкции от плоскости кремниевой пластины (рис. 2);
- микропривода, служащего для перемещения подвижной части конструкции в необходимое положение (рис. 3);
- электрода управления (рис. 4, а, б), с помощью которого осуществляется управление микрозеркалом (рис. 5, а) в волоконно-оптическом микропереключателе;
- микрозеркал, предназначенных для использования в микросканерах и дисплеях (рис. 5, б и в).

Для отработки конструкции и технологии изготовления базовых компонентов использовался пакет программ фирмы *Ansis*, а также были созданы собственные программные продукты. Затем были разработаны и изготовлены тестовые кристаллы базового модуля волоконно-оптического микропереключателя (рис. 6, см. третью сторону обложки) и микросканера с различной формой зеркала (рис. 7, см. третью сторону обложки). Квадратная конструкция зеркала была необходима для разработки методики и расчета прочностных характеристик конструкции микрозеркала.

Создание тестового кристалла проходило в условиях производства и на микроэлектронном оборудовании, на котором изготавлилась и массовая продукция завода "Микрон".

Базовый технологический маршрут изготовления МОЭМС по технологии поверхностной микромеханики заключается в формировании рабочих слоев (Si_x и металлические Al , Ni и Au) и жертвенных слоев (SiO_2 , ФСС), которые в процессе изготовления прибора в необходимой части вытравливаются. При отработке технологии поверхностной микромеханики в условиях микро-

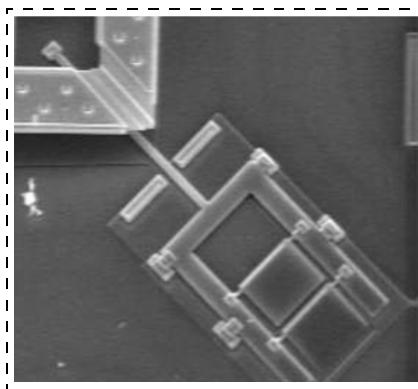


Рис. 2. Актюатор

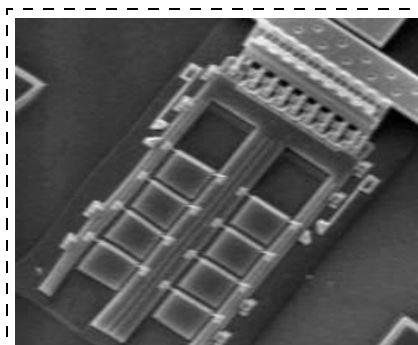
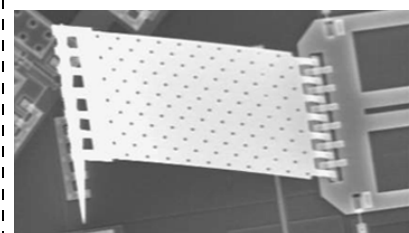
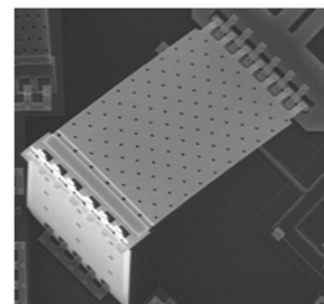


Рис. 3. Микропривод



а)



б)

Рис. 4. Электрод управления

электронного производства были решены следующие проблемы:

- сведены к минимуму механические напряжения в рабочих и жертвенных слоях;
- отработана технология формирования и вытравливания жертвенных слоев;
- оптимизированы условия сушки формируемых структур в процессе изготовления изделий МСТ;
- определены требования к технологическим слоям.

По данной технологии был разработан и изготовлен экспериментальный образец базового

оптического модуля (БОМ). С помощью элементов самосборки компоненты конструкции были установлены параллельно плоскости пластины. Микрозеркало находится в раме, которая с помощью защелки крепится к пластине. При подаче напряжения микрозеркало отклоняется, осуществляя коммутацию информационных каналов. Зеркало поднято с помощью микроприводов на высоту 70 мкм над подложкой, а под зеркалом расположены четыре электрода. Подавая напряжение на электрод, можно управлять зеркалом. Были рассчитаны

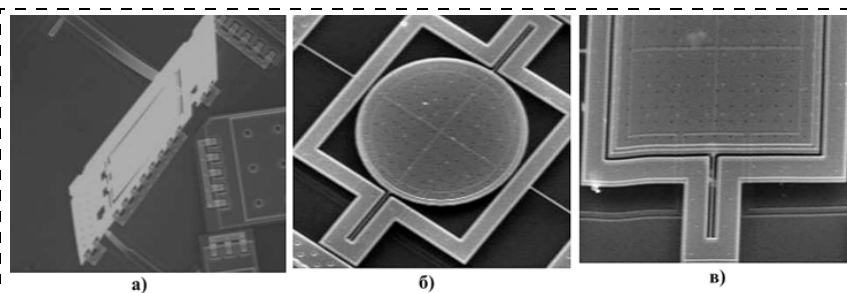


Рис. 5. Микрозеркала

собственные частоты микрозеркала, которые составляют 2 кГц, и определен угол отклонения зеркала — 5° при рабочем напряжении 10 В.

На основе двух вариантов микрозеркал (см. рис. 5, б, в), которые работают по трем координатам, можно изготовить различные варианты средств отобра-

жения и модуляции по различным законам оптической информации. Изготовленные микрозеркала имеют размеры 385×385 мкм и 30×50 мкм в кремниевом кристалле площадью 4×4 мм и коэффициент отражения 30...35 % для поликремния и 60...65 % для никеля.

За рубежом в лаборатории "Сандия" (США) разработан оптический переключатель-мультиплексор на основе МОЭМС с набором из 250 микрозеркал по технологии Summeit-Vsurface MEMS. В настоящее время готовятся к массовому производству переключателя, который состоит из 1000 микрозеркал.

УДК 621.3.049.77.001.2

В. Ю. Мариничев,

Е. Б. Механцев, канд. техн. наук,

Таганрогский государственный радиотехнический университет

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МИКРОНАСОС

В предложенной конструкции рабочими электродами являются пластина монокристаллического кремния со сквозными V-образными отверстиями и металлическая пленка, разделенные тонким слоем диэлектрика. С помощью предложенной математической модели исследована связь сил, действующих на дипольную жидкость, с геометрическими размерами структуры, намечены пути ее оптимизации.

Одну из самых значительных и перспективных ниш на рынке микроустройств занимают микрожидкостные системы. Их основной сферой применения являются медицина и мониторинг окружающей среды. Актуальность исследований в этой области несомненна и подтверждается рядом источников, в частности, сведениями, содержащимися в работе [1].

Объектом рассмотрения данной работы является электрический микронасос, предназначенный для перекачки малых доз непроводящей полярной жидкости. Перемещение жидкости происходит за счет сил, действующих на диполь в неоднородном электростатическом поле, создаваемом электродами. Привлекательным является тот факт, что в структуре насоса нет движущихся (в том числе пульсирующих) элементов и клапанов. Впервые применительно к микросистемной технике такой насос рассмотрен в работе [2]. Однако, хотя предложенная конструкция содержала рабочие электроды, изготовленные методом анизотропного травления из кремния, она была далеко не совершенной как по использованию возможностей, следующих

из принципа действия (большие рабочие зазоры между электродами требовали высоких рабочих напряжений), так и с точки зрения несоблюдения концепции интеграции (использовалась прецизионная операция сборки).

В настоящей работе излагаются результаты исследования по совершенствованию устройства.

Была предложена конструкция и технология изготовления микронасоса, последовательно реализующая идеи интеграции [3]. Отдельные самостоятельные секции сформированы в кремниевой пластине ориентации [100] в виде сетки (матрицы) отдельных ячеек, соединенных параллельно. Сечение одной такой ячейки приведено на рис. 1. Секция насоса содержит два электрода: кремниевый, имеющий в сечении V-образный профиль, и металлический, разделенные тонкой диэлектрической пленкой двуоксида или нитрида кремния.

Технологический процесс изготовления такой структуры основан на последовательности типовых операций, хорошо известных в микроэлектронике. Некоторая специфика имеет место только при травлении: после анизотропного травления ямок (отверстий) пирамидальной структуры на всю глубину полупроводниковой пластины необходимо через эти же ямки организовать селективное сквозное травление вначале диэлектрической, а затем металлической пленки.

Предложенная структура имеет хорошую управляемость конструктивными параметрами. Так, рабочий размер узкой части V-образного отверстия определяется исходной толщиной пластины и размерами окна в маске при проведении анизотропного травления. Значение зазора между электродами однозначно задается толщиной диэлектрической пленки. В необходимых пределах можно менять и толщину металлического электрода.

Для изучения влияния названных конструктивных факторов на работу насоса (рабочий размер отверстий, толщина диэлектрика и металлического электрода) была построена и исследована матема-

тическая модель его рабочей области. Модель основана на описании физического процесса, происходящего в полярном диэлектрике, помещенном в неоднородное электрическое поле.

Известно, что напряженность электрического поля определяется как сила, действующая на единичный заряд, находящийся в электрическом поле.

Дипольную частицу жидкости будем рассматривать как два постоянных, противоположных по знаку электрических заряда, находящихся на расстоянии Δl , которое связано с размерами молекулы жидкости. В поведении такого диполя в электрическом поле можно выделить два момента. Во-первых, он будет ориентироваться по силовым линиям электрического поля так, что положительный заряд диполя направится в сторону отрицательно заряженного электрода, и наоборот. Во-вторых, если поле неоднородно, диполь будет испытывать силу притяжения к заряженному электроду. Действительно, если поле неоднородно, его напряженность E меняется вдоль силовой линии. Это значит, что силы, действующие на пробный заряд, в точках, отстоящих на расстоянии Δl , будут разными. Равнодействующая этих сил будет приложена к диполю и вызовет его перемещение вдоль силовой линии в направлении, где изменение напряженности проходит быстрее. Исходя из этого, можно построить математическую модель расчета сил, действующих на диполь.

Сначала для области, представленной на рис. 1, необходимо найти распределение напряженности поля E . Для этого необходимо решить уравнение Лапласа для потенциала. Ограничиваясь как минимум двумерной моделью структуры для распределения потенциала $\varphi(x, y)$, необходимо решить уравнение

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0$$

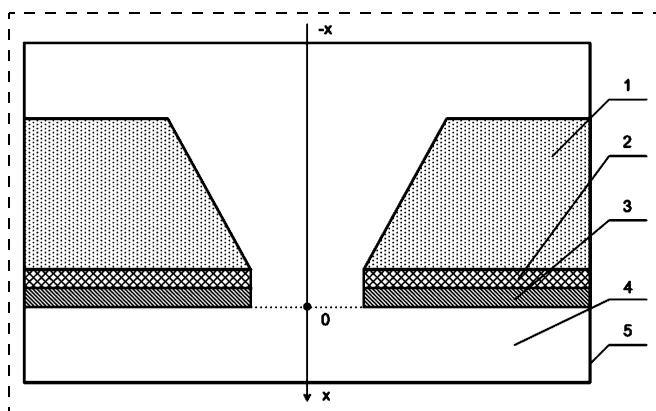


Рис. 1. Структура ячейки электростатического микронасоса: 1 — подложка; 2 — диэлектрик; 3 — металлический электрод; 4 — дипольная жидкость; 5 — граница рабочей области

при следующих граничных условиях:

на подложке $\varphi = 0$;

на металлическом электроде $\varphi = \text{const}$;

на всех других частях контура, ограничивающего рабочую область (включая поверхность диэлектрического зазора) $\partial \varphi / \partial n = 0$, где n — нормаль к поверхности контура.

Найденное распределение потенциала позволяет вычислить значение напряженности поля E в той же области:

$$E(x, y) = \text{grad} \varphi.$$

Чтобы определить силы, действующие на диполь, необходимо определить изменение напряженности поля $E(x, y)$ вдоль силовой линии, т. е. градиент модуля E .

Произведение градиента модуля E на размер диполя Δl и его заряд q даст значение силы F , действующей на диполь и направленной вдоль силовой линии, т. е.

$$F(x, y) = q \Delta l \text{grad} |E|.$$

Численное моделирование сформулированной задачи проводилось с использованием программы *Partial Differential Equation (PDE)* пакета *MatLab*. Для анализа результатов расчета и приведения их к форме, соответствующей поставленной задаче, была разработана дополнительная программа.

Расчеты проводились для рабочих размеров отверстия 10, 30 и 50 мкм при толщине пластины 200 мкм и вариации толщины слоев оксида металла. Значения потенциалов фиксировались на уровнях 0 В на подложке и 10 В на металлическом электроде. Некоторые результаты расчетов приведены на рисунках. Рис. 2 позволяет сопоставить характер распределения напряженности поля E вдоль оси отверстий для разных их размеров. Естественно, что для малых отверстий скорость изменения потенциала существенно выше, чем для больших.

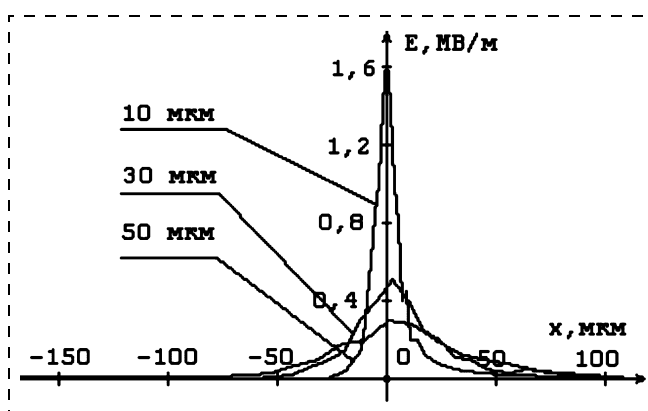


Рис. 2. Распределение напряженности поля в структуре насоса

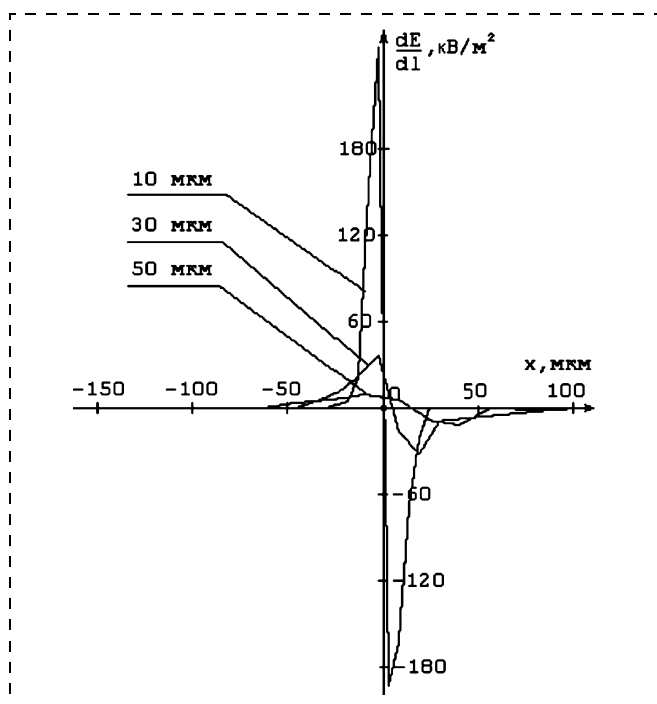


Рис. 3. Распределение градиента модуля напряженности поля в структуре насоса

На рис. 3 приведено распределение градиента модуля напряженности поля, который, как отмечалось ранее, пропорционален силе, вызывающей перемещение диполей. Как видно из графиков, для всех трех рассмотренных случаев силы, действующие на молекулу слева от рабочей области, больше сил, действующих справа, что подтверждает работоспособность насоса. Особенно явно эта разница сил проявляется при наименьшем из рассмотрен-

ных размере отверстия. Необходимо также отметить, что при увеличении размера отверстия точка, где на молекулу действует нулевая сила, смещается вправо, что связано с уменьшением влияния асимметрии структуры.

Проведенное исследование влияния толщины изолирующего слоя (вариация осуществлялась в пределах 0,2...0,5 мкм) выявило два момента. Во-первых, наблюдалось естественное увеличение напряженности поля при уменьшении толщины диэлектрика. Во-вторых, наблюдалось очень слабое изменение градиента напряженности поля, т. е. действующих на диполь сил. Практически это означает возможность снижения рабочих напряжений, необходимых для работы насоса, без существенного влияния на его производительность.

Из анализа графиков, помещенных на рис. 3, следует, что возможна оптимизация структуры по производительности. Действительно, силы, действующие на диполь, возрастают с уменьшением размеров отверстия. В то же время уменьшение размеров отверстия сокращает его пропускную способность. К решению задачи оптимизации можно вернуться после разработки методики расчета производительности насоса, что является предметом дальнейшего исследования.

Список литературы

1. Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—6.
2. Рихтер А. Кремниевый микронасос — новое достижение микрообработки // Электроника. 1990. № 8 (836). С. 8—9.
3. Патент на изобретение № 221 0529 РФ, С1, 7В81В, 1/001. Интегральный микронасос / Механцев Е. Е., Фомичев А. В., Лещенко А. В. № 2102115228/28 заявл. 06.06.2002, 20.08.2003, бюл. № 23. — 1 с.

ИНФОРМАЦИЯ

Трехмерное электромагнитное моделирование элементов топологий СВЧ интегральных схем

Компании AWR (www.mwoffice.com) и Optimal (www.optimalcorp.com) заявили об интеграции своих продуктов Analog Office и O-Wave, что позволит выполнять полное трехмерное электромагнитное моделирование элементов топологий интегральных схем с целью последующей экстракции их паразитных параметров в диапазоне до 50 ГГц. Интеграция этих лучших в своем классе продуктов стала возможной благодаря использованию программного интерфейса EM Socket компании AWR.

Продукт Analog Office компании AWR предлагает пользователям непревзойденные возможности по разработке и моделированию линейных и нелинейных электрических

схем, а также проектированию топологий монолитных СВЧ устройств MMIC и RFIC. Теперь для них открывается прекрасная возможность использовать в рамках привычной среды проектирования вычислительное ядро продукта O-Wave компании Optimal, позволяющее решать специальные задачи, например, анализ подложек с потерями. Пользователь лишь задает геометрию, описывает материалы, способы возбуждения и нагрузки. По полученным из Analog Office данным программа O-Wave автоматически создает трехмерную модель моделируемой структуры и выполняет ее полный электромагнитный анализ методом конечных элементов, после чего возвращает результаты расчета в виде файлов S, Y или Z параметров.

Более подробную информацию о пакете AWR Analog Office можно узнать по адресу:

<http://www.eltm.ru/index.sema?a=pages&id=248>

или по телефону: (095) 974-14-80

УДК 621.3.049.76

И. И. Амиров, канд. физ.-мат. наук,
О. В. Морозов,
М. О. Изюмов, канд. физ.-мат. наук,
В. А. Кальнов*, канд. техн. наук,
А. А. Орликовский*, чл. корр. РАН,
К. А. Валиев*, акад. РАН,
Институт микроэлектроники и информатики
РАН, г. Ярославль,
*Физико-технологический институт РАН,
г. Москва

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ГЛУБОКИХ КАНАВОК В КРЕМНИИ С ВЫСОКИМ АСПЕКТНЫМ ОТНОШЕНИЕМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОМЕХАНИКИ

Представлены результаты исследования процесса травления глубоких канавок в кремнии с высоким аспектным отношением ($A > 20$) в $SF_6 + C_4F_8$ плазме ВЧ индукционного разряда в режиме прерывания расхода SF_6 . Определены характеристики процесса травления узких ($d = 2$ мкм) и широких (60 мкм) канавок в кремнии в зависимости от потенциала ВЧ смещения, времени пассивации и травления. Показаны характерные дефекты, возникающие при травлении глубоких канавок. Определены оптимальные условия формирования канавок с вертикальными стенками. Проводится анализ полученных результатов.

Плазменные процессы анизотропного и глубокого травления кремния являются одними из основных в технологии микросистем. Для формирования канавок в кремнии с высоким аспектным отношением ($A > 20$), которые необходимы при создании микроактюаторов [1–3], микрогиропов [4, 5], процессы травления осуществляются в реакторах высокоплотной фторсодержащей (обычно $SF_6 + C_4F_8$) плазмы ВЧ индукционного разряда в режиме прерывания расхода газов [6–7]. В таком режиме, когда процесс осуществляется попеременно при низкой и высокой концентрации SF_6 в смеси, достигается высокая скорость травления канавок с вертикальными стенками. При низкой концентрации SF_6 — периоде пассивации — происходит осаждение фторуглеродной пленки на дно и боковую стенку канавки, а при высокой концентрации SF_6 — быстрый унос материала, в основном, со дна канавки. При этом достигается высо-

кая анизотропия травления. Характеристики процесса зависят от многих параметров — давления, мощности, потенциала ВЧ смещения, расходов газа, состава SF_6/C_4F_8 смеси, температуры подложки, отношения длительности времен пассивации и травления, организации процесса. Процесс характеризуется разной скоростью травления узких и широких канавок и замедлением скорости травления канавки во времени [7, 8]. Такой апертурный эффект проявляется в широком диапазоне параметров и обусловлен различными механизмами [7]. С увеличением глубины канавки изменяются условия доставки химически активных реагентов, ионов и радикалов на дно и стенки канавки, что ведет к замедлению во времени скорости травления, возникновению различного рода нарушений анизотропии травления. Это такие эффекты, как локальное травление боковой стенки или возникновение отрицательного угла наклона боковых стенок в широких канавках. Для предотвращения этих эффектов необходимо в течение времени травления изменять параметры процесса [7–10].

Целью данной работы являлось исследование влияния различных технологических параметров — отношения времени пассивации и травления, отрицательного потенциала ВЧ смещения — на характеристики травления (скорость, анизотропность) узких (2–3 мкм) и широких (> 60 мкм) канавок в кремнии, а также длительности времени пассивации и травления на формирование канавки во фторуглеродной $SF_6 + C_4F_8$ плазме ВЧ индукционного разряда. В работе показано, как, изменяя в процессе травления глубину модуляции расхода газа, можно добиться практически вертикальных стенок как широких, так и узких канавок.

Эксперимент

Эксперименты проводили в реакторе, в котором генерируется плазма ВЧ индукционного разряда (рис. 1). Разряд зажигали в разрядной камере — кварцевом стакане (диаметр 10 см и длина 15 см) — с помощью ВЧ генератора ($f = 13,56$ МГц, $W = 2$ кВт). Из разрядной камеры плазма диффузно распространялась в реакционную металлическую камеру (диаметр 30 см). В камере на расстоянии 7,5 см от нижнего края разрядной камеры был расположен плоский, водоохлаждаемый (диаметр 15 см) ВЧ электрод. На него устанавливался держатель подложки (Al диск, диаметр 16 см, толщина 20 мм). Для задания необходимого отрицательного потенциала смещения на электрод от отдельного ВЧ ге-

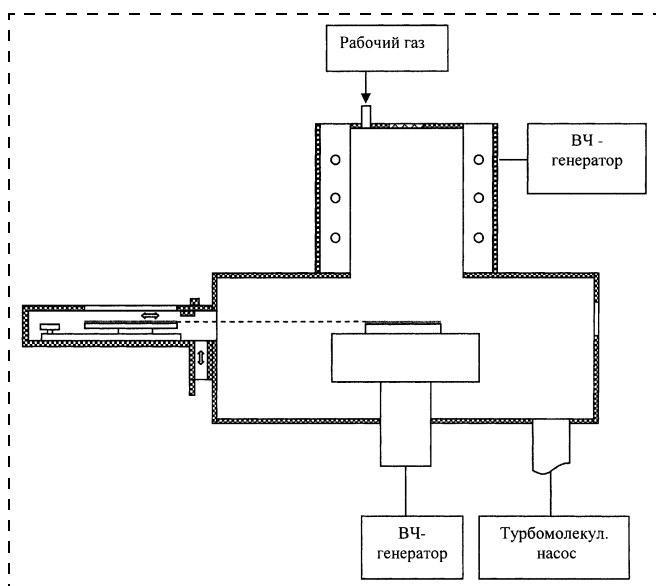


Рис. 1. Блок-схема реактора

нератора ($f = 13,56$ МГц, $W = 600$ Вт) подавали определенную $W_{\text{см}}$ мощность ВЧ смещения. Рабочие газы подавали через расходомер в разрядную камеру. Давление газа измеряли баратроном, показания которого не зависели от рода газа. Откачка газов проводилась одним или двумя турбомолекулярными насосами (ТМН) производительностью 400 л/с. Предельный остаточный вакуум составлял $2 \cdot 10^{-4}$ Па. Эксперименты проводили при давлении 5...7 Па, ВЧ мощности на индукторе 800...1500 Вт. Суммарный расход газов не превышал 220 нсм³/мин.

Образцами служили пластинки монокристаллического кремния с тонким слоем хрома ($d = 0,2$ мкм) на поверхности. В слое металла методом литографии была сформирована маска — система параллельных полос шириной 3 и 60 мкм. Для предотвращения быстрого нагрева образцов в плазме они устанавливались на держателе с использованием вакуумной смазки. За время травления (1...5 мин) образцы нагревались не выше 330 К. Размеры образцов составляли 2...4 см². Загрузка образцов в реактор осуществлялась через загрузочную камеру. Травление проводили в смеси газов SF₆/C₄F₈. Изменение содержания SF₆ в смеси осуществляли варьированием его расхода от 5 до 100 нсм³/мин. Поток C₄F₈ при этом был постоянным и составлял 40 или 100 нсм³/мин. Длительность прерывания τ_1 — время пассивации — изменяли от 2 до 10 с, а время травления τ_2 — от 6 до 30 с. При колебаниях расхода SF₆ давление изменялось в пределах от 1 до 7 Па. ВЧ мощность смещения на стадиях травления и пассивации составляла 5...100 Вт.

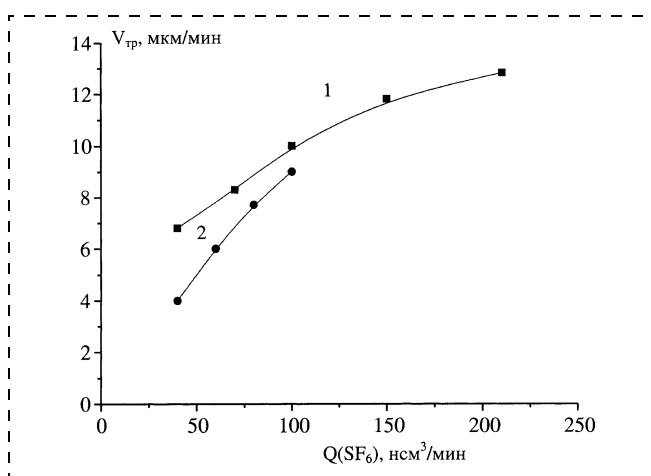
Профиль канавок травления в кремнии наблюдали на растровом электронном микроскопе LEO

430 и оптическом микроскопе NEOPHOT. Скорость травления кремния определяли по размеру ступеньки, протравленной за известное время. Размер ступеньки измеряли с помощью оптического микроинтерферометра МИИ-4.

Результаты и обсуждение

Скорость травления кремния в режиме пассивация/травление определяется стадией травления. Поэтому важно знать максимальную скорость травления кремния на стадии изотропного его травления. В SF₆ плазме скорость травления кремния составляла 8 мкм/мин ($P = 0,74$ Па, $Q = 50$ нсм³/мин, $W = 800$ Вт, откачка одним ТМН). Необходимо отметить, что при зажигании разряда в SF₆ давление в реакторе увеличилось с 0,42 до 0,74 Па. Такой рост давления можно объяснить повышением концентрации частиц в реакторе в результате диссоциации молекул SF₆ в плазме. В плазме SF₆/C₄F₈ (40/40) изменение давления было еще выше. При включении разряда давление газа увеличивалось более чем в 5 раз. В SF₆ плазме с увеличением расхода газа с 40 до 220 нсм³/мин (откачка двумя ТМН) при поддержании постоянного давления $P_{\text{пл}} = 5,7$ Па скорость травления Si увеличилась почти в 2 раза (кривая 1, рис. 2). Еще более сильный рост скорости травления Si с увеличением расхода SF₆ наблюдался в плазме SF₆ + C₄F₈ (кривая 2, рис. 2). Расход C₄F₈ составлял 70 нсм³/мин. Рост скорости травления кремния с увеличением расхода газа объясняется ростом концентрации атомов фтора в плазме [6].

Травление узких канавок (2 мкм) в кремнии при τ_1 и τ_2 , равных 8 и 16 с, одинаковой мощности ВЧ смещения 50 Вт в режиме травления и 70 Вт в ре-

Рис. 2. Зависимость скорости травления кремния от расхода SF₆ в плазме различного состава:

1 — SF₆; 2 — смесь SF₆ + C₄F₈; $P_{\text{пл}} = 5,7$ Па, $W_{\text{ин}} = 1,5$ кВт, $U_{\text{см}} = -50$ В

жиме пассивации показало, что стенки канавки были вертикальными (рис. 3, см. четвертую сторону обложки). Канавки глубиной 18 мкм были протравлены за 9 мин. Однако дальнейшее травление Si показало, что под маской возникает подтрав (рис. 4, см. четвертую сторону обложки).

Характерное боковое травление стенки очевидно обусловлено угловым распределением ионного потока. Оно начинает развиваться, если пассивирующее действие полимерной пленки на боковой стенке будет недостаточно сильным. О недостаточной пассивации стенки свидетельствует также возникновение отрицательного угла наклона стенки, что приводит к уширению канавки вблизи дна. Можно отметить, что такой локальный боковой подтрав кремния вблизи края маски наблюдался также при формировании узкой канавки в плазме SF_8/O_2 [11]. Он тоже возникал при достижении 20 мкм глубины канавки. Причина его возникновения после достижения такой глубины остается неясной.

При уменьшении времени пассивации с 10 до 2 с, а времени травления в цикле с 30 до 6 с (сохраняя при этом постоянным их отношение, равное трем), скорость травления узких канавок (до глубины 12 мкм) падала с 1,7 до 1,2 мкм/мин. Стенки канавки во всех случаях были вертикальными, однако характерные зубцы на боковых стенках канавки при минимальных временах травления и пассивации (6 и 2 с) уже не наблюдались. Уменьшение времени пассивации и травления в цикле является эффективным приемом их формирования [7].

С увеличением времени травления глубина узкой канавки монотонно уменьшалась (рис. 5,

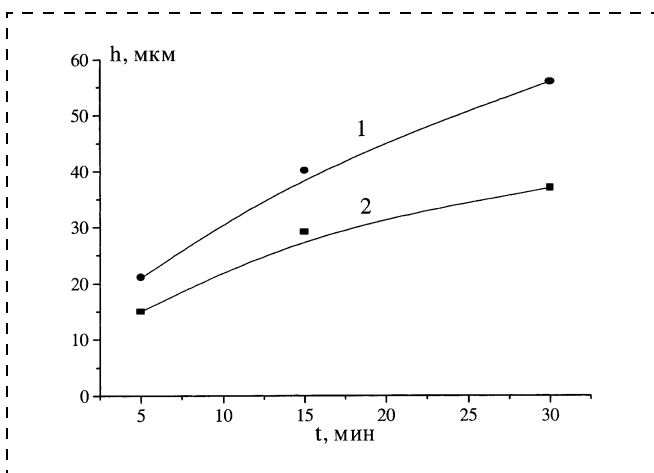


Рис. 5. Зависимость глубины травления канавки шириной 60 мкм (1) и 2 мкм (2) от времени травления в $C_4F_8 + SF_6$ плазме:

$\tau_1 = 10$ с, $\tau_2 = 20$ с, $P_{тр} = 6,5$ Па, $W_{инд} = 800$ Вт, $U_{см} = 50...70$ В

кривая 2). При таких же условиях травление широких (60 мкм) канавок происходило на большую глубину (рис. 5, кривая 1). Скорость травления кремния в таких канавках также уменьшалась во времени, хотя и более медленно, чем в узких канавках.

Такая кинетика травления наблюдалась при ВЧ мощности смещения на стадии осаждения и травления, равной 50 и 70 Вт, соответственно. С увеличением ВЧ мощности смещения в режиме пассивации/травления до 100 Вт скорость травления кремния увеличилась до 2,5 мкм/мин. Начальная скорость травления равнялась 2,75 и 3,85 мкм/мин при мощности ВЧ смещения, равной 50 и 100 Вт соответственно. Однако их травление в указанном режиме не было анизотропным. Профиль канавки имеет характерный отрицательный наклон, как это показано на рис. 6, а. Такой профиль широкой канавки наблюдался и при увеличении расхода SF_6 и C_4F_8 до 100 и 70 нсм³/мин соответственно, и увеличении скорости откачки в 2 раза. Надо отметить, что отрицательный угол наклона стенки у широкой канавки неизбежно возникает при ее глубоком травлении [7–9].

Травление канавки (рис. 6, а) глубиной 40 мкм осуществлялось в четыре этапа по 3,5 мин в каждом. Поэтапное формирование канавки проявилось в виде выступов на боковой стенке канавки (рис. 6, а). Одинаковое расстояние между выступами свидетельствует, что на каждом этапе скорость травления была одинаковой и составляла 3,2 мкм/мин. В таком режиме травления кроме сильного отрицательного наклона стенки канавки наблюдается значительное боковое травление кремния. Боковое травление особенно сильно проявлялось при травлении узких канавок (рис. 7, а, см. четвертую сторону обложки). Видно, что хотя стенки узкой канавки оставались вертикальными и параллельными, уширение канавки произошло приблизительно на 4 мкм (2 мкм на сторону). Развитие отрицательного угла наклона стенки широкой канавки, а также подтрав под маску могут свидетельствовать о недостаточной сильной пассивации боковой стенки канавки стенки вблизи дна канавки с увеличением ее глубины. Действительно, если усилить стадию пассивации путем постепенного уменьшения расхода SF_6 на стадии пассивации с 13 до 8 нсм³/мин на каждом этапе травления, то стенки широкой канавки становились почти вертикальными (см. рис. 6, б). Отклонение стенки от вертикальности наблюдалось только на первом этапе травления. Травление же узкой канавки происходило практически без подтрав под маску (уход под маску был минимальным и равнялся 200 нм), а стенки канавки были вертикальными (рис. 7, б). Таким образом,

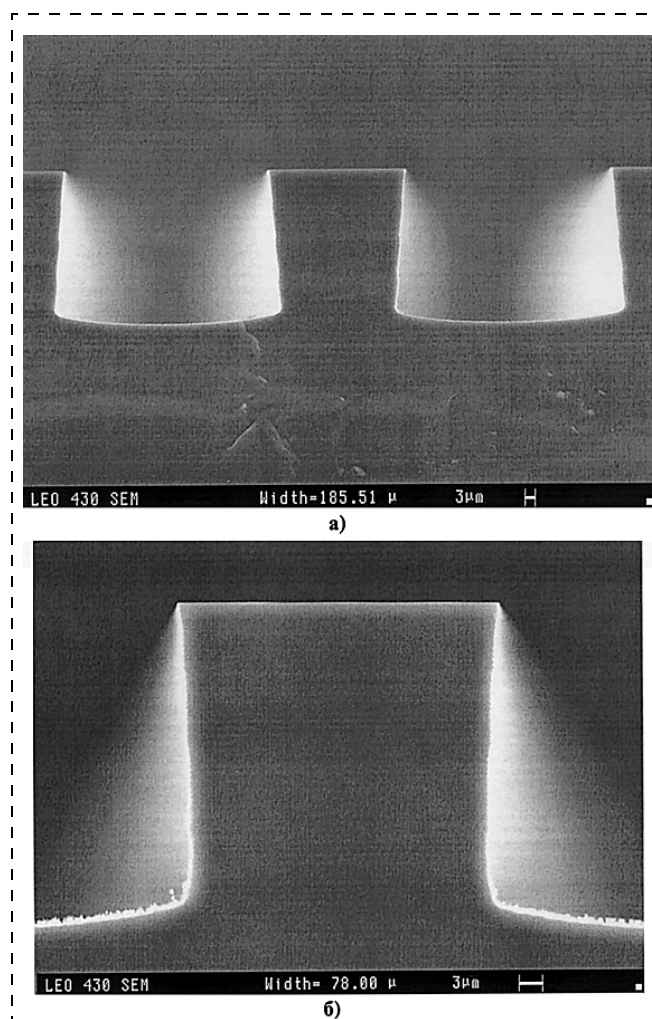


Рис. 6. Профиль широкой канавки (60 мкм) глубиной 40 мкм, протравленной за 14 мин (четыре стадии) при постоянных условиях травления (а) и при изменении условий травления (б):

$\tau_1 = 6$ с; $\tau_2 = 10$ с, $P_{\text{тр}} = 6,5$ Па, $W_{\text{инд}} = 1500$ Вт, $W_{\text{см}} = 30 \dots 50$ Вт, $U_{\text{см}} = 60 \dots 80$ В

изменяя в процессе травления условия процесса, удается достигнуть вертикальности стенок.

Возможность изменения профиля канавок травления различной ширины путем усиления или уменьшения стадии пассивации отмечалось также в работах [11, 12]. В $\text{SF}_6/\text{C}_4\text{F}_8$ плазме, усиливая стадию пассивации путем увеличения ее длительности, удается изменить отрицательный наклон стенки на полностью вертикальный при небольших аспектных отношениях канавки ($A < 10$). Однако в нашем случае при одновременном травлении канавок разной ширины (2 и 60 мкм) для достижения вертикальности стенок необходимо непрерывное усиление стадии пассивации уже в течение короткого времени проведения процесса

(3,5 мин). Такую сильную зависимость степени анизотропии травления от времени можно объяснить тем, что в процессе травления происходит нагрев подложкодержателя. В результате этого скорость образования полимерной пленки на стенке канавки непрерывно уменьшалась, что вело к развитию у нее отрицательного угла наклона. Для подавления этого эффекта уменьшали расход SF_6 на стадии пассивации, что эквивалентно увеличению расхода C_4F_8 . Такое изменение расхода газа явилось эффективным и удобным способом усиления роста пассивирующей полимерной пленки на боковых стенках канавки.

Таким образом, определены характеристики процесса травления узких ($d = 2$ мкм) и широких (60 мкм) канавок во фторсодержащей $\text{SF}_6 + \text{C}_4\text{F}_8$ плазме ВЧ индукционного разряда в режиме прерывания расхода SF_6 . Представлены характерные дефекты, возникающие при травлении глубоких канавок. Показано, что усиливая стадию пассивации в процессе травления, удается добиться формирования канавок с вертикальными стенками.

Список литературы

1. Sarajlic E., Berenschot E., Krijnen G., Elwenspoek M. Versatile trench isolation technology for the fabrication of microactuators // *Microelectronic Engineering*. 2003. V. 67–68. P. 430–437.
2. Tsai J. M.-L., Chu H.-Y., Hsieh J., Fang W. The BELST II process for a silicon high-aspect-ratio micromachining vertical comb actuator and its application // *J. Micromech. Microeng.* 2004. V. 14. P. 235–241.
3. Bertz A., Kuchler M., Knofler R., Gessner T. A novel high aspect ratio technology for MEMS fabrication using standard silicon wafers // *Sensors and Actuators*. 2002. V. A97–98. P. 691–701.
4. Fu L., Miao J. M., Li X. X., Lin R. M. Study of deep silicon etching for micro-gyroscope fabrication // *Applied Surface Science*. 2001. V. 177. P. 78–84.
5. Laermer F., Urban A. Challenges, developments and applications of silicon deep reactive ion etching // *Microelectronic Engineering*. 2003. V. 67–68, P. 349–355.
6. McAuley S. A., Ashraf H., Atabo L., Chambers A., Hall S., Hopkins J., Nicholls G. Silicon micromachining using a high-density plasma source // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2001. V. 34. P. 2769–2774.
7. Rangelow I. W. Critical tasks in high aspect ratio silicon dry etching for microelectromechanical systems // *J. Vac. Sci. Technol.* 2003. V. A21. N 4. P. 1550–1562.
8. Kiihamaki J., Franssila S. Pattern shape effects and artifacts in deep silicon etching // *J. Vac. Sci. Technol.* 1999. V. A17. N 4. P. 2280–2285.
9. Rauf S., Dauksher W. J., Clemens S. B., Smith K. H. Model for a multiple-step deep Si etch process // *J. Vac. Sci. Technol.* 2002. V. A20. N 4. P. 1177–1190.
10. Blauw M. A., Craciun G., Sloff W. G., French P. J., Van der Drift E. Advanced time-multiplexed plasma etching of high aspect ratio silicon structures // *J. Vac. Sci. Technol.* 2002. V. B20. N 6. P. 3106–3110.
11. Boufnichel M., Aachboun S., Grageon F., Lefauchaux P., Ranson P. Profile control of high aspect ratio trenches of silicon. I. Effect of process parameters on local bowing // *J. Vac. Sci. Technol.* 2002. V. B20. N 4. P. 1508–1513.
12. Craigie C. J. D., Sheehan T., Jonson V. N., Burcett S. L., Moll A. J. Polymer thickness effect on Bosch etch profiles // *J. Vac. Sci. Technol.* 2002. V. B20. N 6. P. 2229–2232.

УДК 537.621:538.975

А. В. Бутко, А. Г. Веселов, канд. физ.-мат. наук,
С. Л. Высоцкий, канд. физ.-мат. наук, А. В. Кожевников,
Ю. А. Филимонов, канд. физ.-мат. наук,
Саратовское отделение Института радиотехники и электроники РАН,
С. А. Никитов, чл.-корр. РАН,
Институт радиотехники и электроники РАН (г. Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ВОЛНОВЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В РЕШЕТКАХ ИЗ ПЕРМАЛЛОВЫХ МИКРОЧАСТИЦ*

Методом ферромагнитного резонанса исследован спектр спин-волновых возбуждений касательно намагниченных решеток из прямоугольных пермалловых микрочастиц. Обнаружены дополнительные по сравнению со случаем сплошной пленки пики поглощения. Показано, что их возникновение связано с возбуждением неоднородных резонансов обратных объемных и дипольно-обменных поверхностных магнитоэлектрических волн. Исследовано влияние поворота решетки в плоскости намагничивания на положение и интенсивность резонансных пиков.

В последние годы активно исследуется возможность практического применения перемангничивания магнитной микрочастицы для записи (считывания) одного бита информации. Современные технологии позволяют получать элементы субмикрометровых размеров [1], что позволяет рассчитывать на достижение в структурах на их основе плотности записи до 750 Гбит/дюйм² [2]. При исследовании столь малых частиц необходимо учитывать влияние их формы как на статические, так и на динамические магнитные свойства из-за возрастания роли полей размагничивания [3]. Так, например, вид петли гистерезиса решеток из микрочастиц зависит от направления приложения внешнего постоянного магнитного поля относительно осей решетки и (или) осей симметрии элемента [4]. Дискретность таких структур облегчает возможность возбуждения в них неоднородных спин-волновых колебаний, представляющих собой связанные диполь-

но-обменные моды, обнаруженные с помощью методов Бриллюэновского рассеяния света [5] и ферромагнитного резонанса (ФМР) [6, 7]. Спектр и интенсив-

ность этих мод оказались связаны как с топологией решетки, так и с формой и размерами самих элементов, при этом в известных нам публикациях высокочастотные свойства решеток из прямоугольных частиц не исследовались. В данной работе исследованы спектры спин-волновых возбуждений решеток, состоящих из пермалловых прямоугольников микрометровых размеров с разным отношением длина/ширина.

Магнитная пленка Fe₁₀Ni₆₀Cr₂₅ толщиной $t \approx 60$ нм была напылена магнетронным способом на подложку Si (111) при комнатной температуре. С помощью технологии электронно-лучевой литографии из нее формировались прямоугольные частицы, при этом часть пленки оставлялась сплошной для определения ее магнитных параметров аналогично описанному в [8]. На рис. 1 приведены изображения поверхностей решеток, полученные с помощью сканирующего атомно-

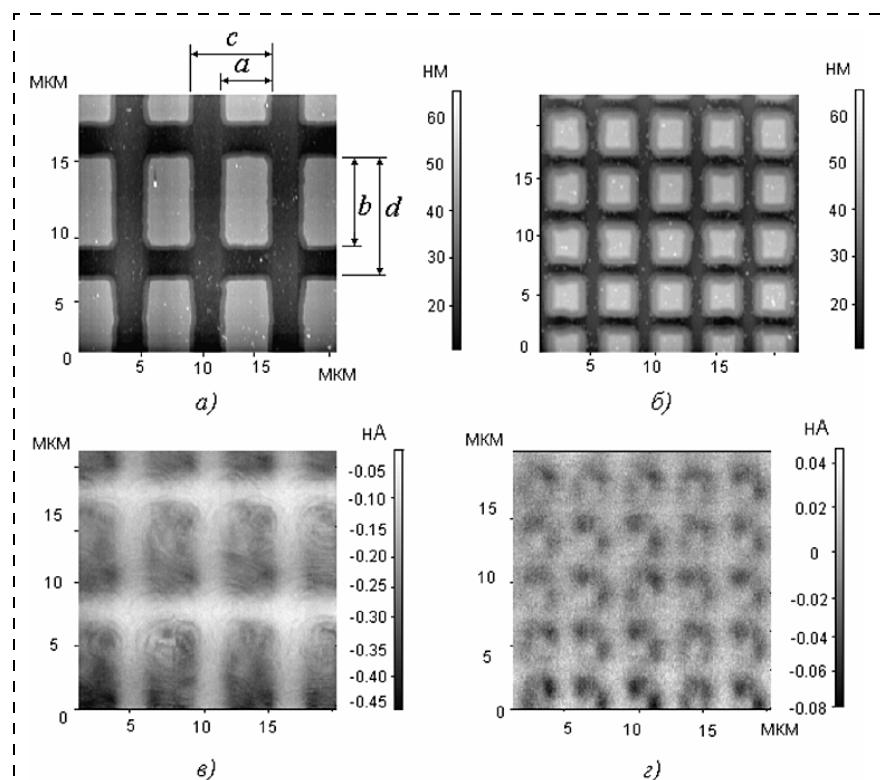


Рис. 1. Вид поверхности (а, б) и магнитно-силовые изображения (в, г) решеток типа 1 и 2 соответственно

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ " 04-02-17357.

силового микроскопа Solver P47 NT-MDT. Видно, что в первом случае решетка с параметрами $c = 6$ мкм и $d = 9$ мкм состоит из прямоугольных элементов шириной $a = 3$ мкм и длиной $b = 6$ мкм (рис. 1, а). Форма элементов и элементарная ячейка решетки типа 2 (рис. 1, б) близки к квадратной: $a = 3$ мкм, $b = 3,5$ мкм, $c = 4,2$ мкм и $d = 4,5$ мкм.

Спектр ферромагнитного резонанса исследовался на частоте 9,8 ГГц при изменении внешнего постоянного магнитного поля H_0 в диапазоне 11,15–398,1 кА/м. Модуляция поля H_0 с частотой 30 кГц обеспечивала возможность регистрации зависимости производной отраженной от резонатора мощности от величины H_0 (далее — кривая ФМР). Образцы намагничивались касательно и могли поворачиваться на угол θ между направлением поля H_0 и осью решетки ($\theta = 0^\circ$ соответствует намагничиванию вдоль длинной стороны прямоугольника).

На рис. 2, а и б представлены кривые ФМР, полученные для решетки типа 1 при $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 90^\circ$ соответственно. Из сравнения со случаем сплошной пленки (рис. 2, в) видно, что в дополнение к однородному (наиболее интенсивному) резонансу появилось несколько дополнительных при значениях полей больше ("высокополевые") и меньше ("низкополевые"), чем для основного резонанса.

Обсудим возможные причины их возникновения.

Известно, что в случае касательно намагниченной магнитной пленки области полей выше, чем для однородного резонанса, соответствует спектр дипольных обратных объемных магнитостатических волн (ООМСВ), распространяющихся вдоль направления H_0 ($q \parallel H_0$) [9]. Предположим, что "высокополевые" пики поглощения отвечают размерным резонансам этих волн. Поскольку распределение высокочастотного поля по площади частицы близко к однородному, то для возбуждения размерных резонансов ООМСВ необходимо, чтобы вдоль характерного размера элемента укладывалось нечетное число полуволн. Тогда при $\theta = 0^\circ$ значения резонансных полей должны соответствовать волновым числам ООМСВ

$$q_n \approx \frac{\pi}{b} (2n - 1), \quad n = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

а при $\theta = 90^\circ$ резонансы должны устанавливаться вдоль короткой стороны прямоугольника:

$$q_n \approx \frac{\pi}{a} (2n - 1), \quad n = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

Расчеты магнитных полей H_n , отвечающих возбуждению ООМСВ с такими волновыми числами, были проведены в приближении однородности внутреннего магнитного поля для значений намагниченности насыщения, соответ-

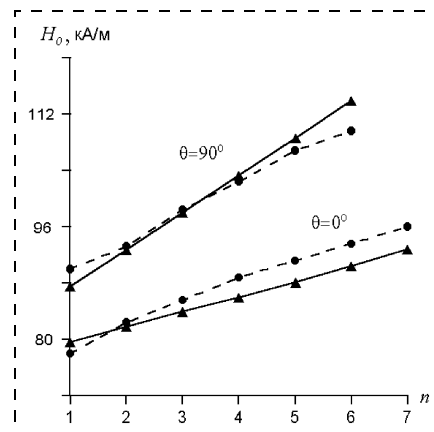


Рис. 3. Экспериментально полученная (кружки) и рассчитанная (треугольники) зависимости "высокополевых" резонансных полей в решетке типа 1 от номера резонанса n

вующей сплошному участку пленки, $4\pi M_0 = 1,15$ Тл и обменной жесткости $A = 1,2 \times 10^{11}$ Дж/м. Для сравнения с экспериментальными результатами необходимо учесть, что внутреннее поле частицы зависит от поля размагничивания H_d :

$$H_{\text{вн}} = H_0 - H_d, \quad (3)$$

которое для прямоугольных элементов можно представить в виде

$$H_d^a = - \frac{8 M_0 t b}{a \sqrt{a^2 + b^2}} \quad (4)$$

для внешнего поля, направленного вдоль ширины a элемента, и

$$H_d^b = - \frac{8 M_0 t a}{b \sqrt{a^2 + b^2}} \quad (5)$$

при намагничивании вдоль длины b [10].

На рис. 3 видно, что экспериментально полученные результаты (кружки) и расчетные (треугольники) качественно совпадают. Расхождение связано с тем, что примененная в расчетах модель однородности внутреннего высокочастотного поля не описывает его реальное распределение внутри частицы.

Область существования двух "низкополевых" дополнительных резонансов соответствует спек-

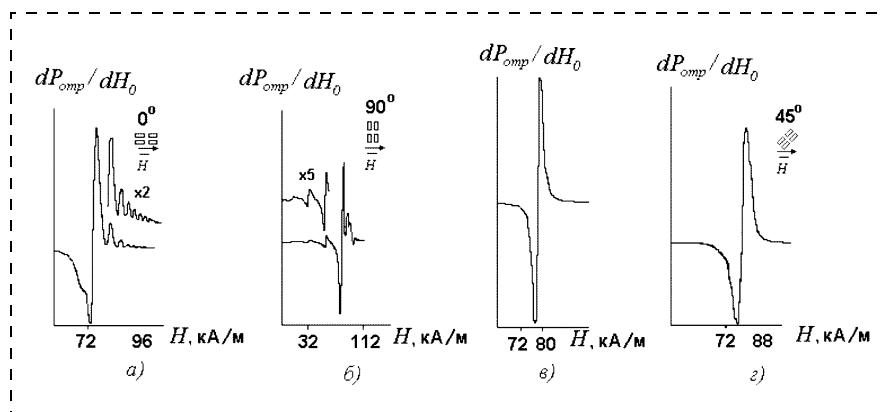


Рис. 2. Спектры ФМР решетки типа 1 для $\theta = 0^\circ$ (а), $\theta = 90^\circ$ (б), $\theta = 45^\circ$ (в) и сплошной пленки (г)

трам обменных мод спин-волнового резонанса (СВР) по толщине пленки и дипольных поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) Дэймона—Эшбаха ($q \perp H_0$), между которыми возможна гибридизация [9, 11, 12]. На рис. 4 изображены рассчитанные аналогично [13] дисперсионные зависимости дипольно-обменных волн при величинах магнитного поля 55 кА/м (кривые 1) и 21,1 кА/м (кривые 2). Видно, что их пересечению с горизонтальной штриховой линией уровня 9,8 ГГц (рабочая частота спектрометра) отвечают определенные с помощью выражения (2) при $\theta = 0^\circ$ волновые числа $q_1 = 10,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ и $q_2 = 31,4 \times 10^3 \text{ см}^{-1}$. С учетом формулы (3) расчетные резонансные значения внешнего магнитного поля $H_p^{(n)}$ для мод, соответствующих $n = 1$ и $n = 2$, составляют $H_p^{(1)} = 57,3 \text{ кА/м}$ и $H_p^{(2)} = 23,9 \text{ кА/м}$ (в эксперименте — 67 кА/м и 36 кА/м).

Аналогичные зависимости для случая $\theta = 90^\circ$ приведены на рис. 5. Цифрами 1, 2, 3 обозначены кривые, полученные для значений внутреннего поля $H_1 = 67 \text{ кА/м}$, $H_2 = 43,8 \text{ кА/м}$ и $H_3 = 23,5 \text{ кА/м}$. Из рисунка видно, что можно ожи-

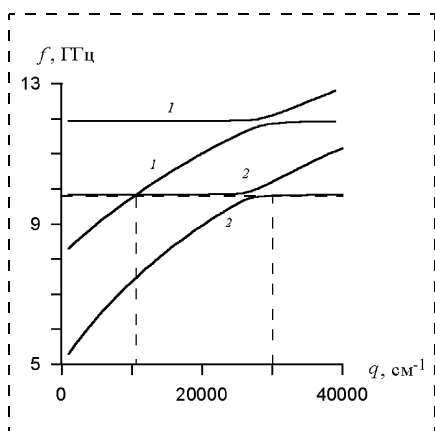


Рис. 4. Дисперсионные зависимости дипольно-обменных волн в решетке типа 1 при $\theta = 0^\circ$ для $H_0 = 55 \text{ кА/м}$ (1) и $21,1 \text{ кА/м}$ (2)

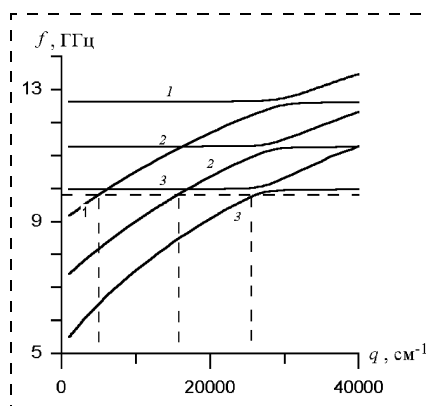


Рис. 5. Дисперсионные зависимости дипольно-обменных волн в решетке типа 1 при $\theta = 90^\circ$ для $H_0 = 67 \text{ кА/м}$ (1), $43,8 \text{ кА/м}$ (2) и $23,5 \text{ кА/м}$ (3)

дать наблюдения трех резонансов с волновыми числами (4) при значениях внешнего поля [с учетом формулы (3)] $H_p^{(1)} = 76,5 \text{ кА/м}$, $H_p^{(2)} = 54,15 \text{ кА/м}$ и $H_p^{(3)} = 34 \text{ кА/м}$. В эксперименте наблюдалось только два резонанса при 34 и 48,6 кА/м. Вероятной причиной этого является то, что третий резонанс располагается в области расталкивания дисперсионных кривых, где его положение резко зависит от параметров, задаваемых при расчете.

Отметим, что в "низкополевой" области спектра ФМР решетки типа 2 в эксперименте наблюдается единственный пик поглощения (рис. 6, б). Слабая за-

висимость его положения от угла θ свидетельствует о преимущественно обменном механизме его возникновения, в то же время интенсивность резонанса существенно изменяется при развороте (рис. 7). Это изменение можно связать с влиянием неоднородности внутреннего поля и изменением условий гибридизации с ПМСВ.

Еще одной причиной возникновения пика поглощения при малом внешнем подмагничивающем поле может являться резонанс доменной структуры [14]. О существовании регулярной доменной структуры в полосках из пермаллоя шириной 2–5 мкм и толщиной 70 нм сообщалось, например, в [15]. В элементах исследованных нами решеток в отсутствие внешнего магнитного поля также наблюдается мультидоменная структура (см. рис. 1, в, г). К сожалению, у нас не было возможности получать магнито-силовые образцы поверхности при изменении внешнего подмагничивающего поля. Тем не менее мы исследовали процесс перемагничивания решеток, наблюдая за поведением петель гистерезиса, регистрируемых с использованием меридионального магнитооптического эффекта Керра [16] (рис. 8). Видно, что поля насыщения решеток обоих типов не превышают 20 кА/м. Следова-

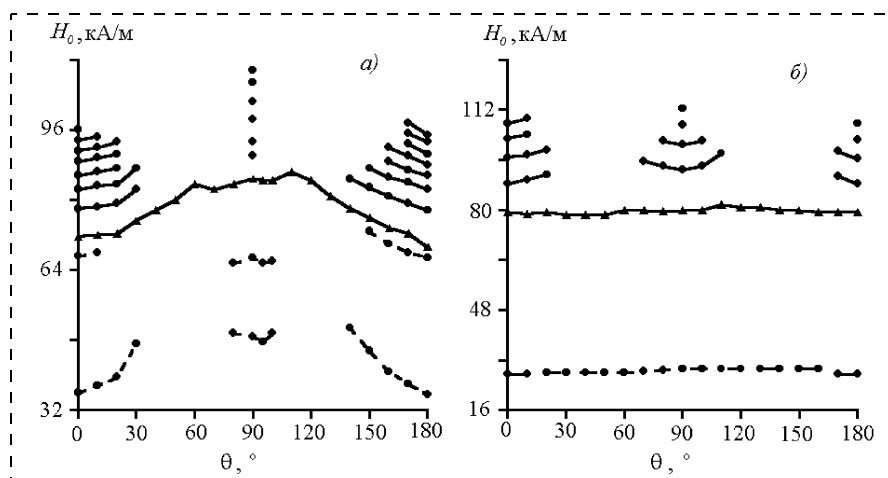


Рис. 6. Зависимости спектров ФМР для решетки типа 1 (а) и типа 2 (б) от угла θ

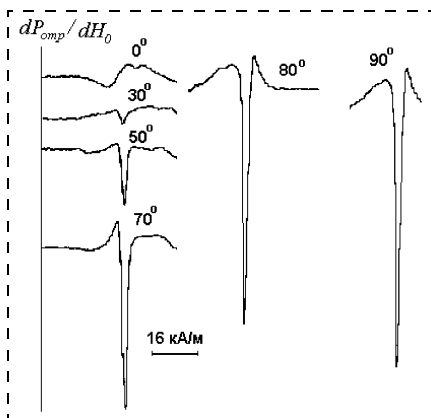


Рис. 7. Зависимость интенсивности "низкополевого" резонанса в решетке типа 2 от угла θ

тельно, наблюдаемые в эксперименте резонансы с большими полями не могут быть обусловлены спин-волновыми возбуждениями в доменной структуре.

Таким образом, возникновение "низкополевых" пиков поглощения связано с возбуждением дипольно-обменных резонансов ПМСВ.

Рассмотрим зависимости спектров ФМР структуры типа 1 (см. рис. 6, а) и типа 2 (см. рис. 6, б) от угла θ . На рисунках кривые, помеченные треугольниками, соответствуют основному резонан-

су а сплошные и штриховые линии относятся к "высокополевым" и "низкополевым" резонансам соответственно. Видно, что с увеличением угла θ число наблюдаемых дополнительных пиков уменьшается (в эксперименте это соответствует постепенному уменьшению их интенсивности), и при $\theta \approx 30^\circ$ – 70° наблюдается только один резонанс (см. также рис. 2, з), за исключением "низкополевой" области решетки типа 2. На наш взгляд наиболее вероятной причиной этого может являться изменение условий резонанса дипольных волн (ООМСВ и ПМСВ), поскольку направления вдоль и перпендикулярно магнитному полю перестают соответствовать параллельным отражающим торцам прямоугольников. В то же время "низкополевой" пик поглощения в решетке типа 2 (преимущественно обменной природы — см. выше) существует во всем интервале изменения угла θ .

Из сравнения рис. 6, а и 6, б видна разница в характере угловых зависимостей значения поля основного резонанса — для решетки типа 2 она практически не меняется, тогда как для решетки ти-

па 1 при изменении угла θ от 0 до 90° изменение δH составляет 13 кА/м и примерно соответствует разности полей размагничивания H_d^b и H_d^a ($\delta H \approx H_d^b - H_d^a \approx 8,8$ кА/м). В случае почти квадратных элементов решетки типа 2 поля размагничивания при вращении изменяются слабо, что определяет малость значения δH . Отметим, что аналогичные зависимости наблюдались и при проведении магнитооптических исследований зависимости полей насыщения решеток от угла θ (см. рис. 8, а, б).

Таким образом, методами ферромагнитного резонанса, магнитооптического эффекта Керра, атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии исследованы два типа тонкопленочных структур, состоящих из прямоугольных (3×6 мкм и $3 \times 3,5$ мкм) магнитных частиц, образующих решетки с параметрами ячейки 6×9 мкм и $4,2 \times 4,5$ мкм соответственно. При касательном намагничивании в спектре ФМП обоих типов структур обнаружены пики поглощения, связанные с возбуждением неоднородных резонансов обратных объемных магнитостатических волн и гибридных дипольно-обменных поверхностных магнитостатических волн. Исследована зависимость их положения и интенсивности от угла поворота решеток в плоскости намагничивания.

Список литературы

1. Malkinski L., Camley R. E., Celinski Z. et al. Hexagonal lattice of 10-nm magnetic dots // Journal of Applied Physics. 2003. Vol. 93(10). P. 7325–7327.
2. Torres L., Lopez-Diaz L., and Alejos O. Micromagnetic analysis of recording processes in periodic antidot arrays: Interaction between adjacent bits // Journal of Applied Physics. 2001. Vol. 87(9). P. 5645–5647.
3. Kittel C. Introduction to Solid Physics // 7th ed., Wiley, New York, 1996.
4. Zhu X., Grütter P., Metlushko V., Ilic B. Magnetic force microscopy study of electron-beam-patterned soft permalloy particles: Technique and magnetization behavior // Physical Review B. 2002. Vol. 66.
5. Gubbiotti G., Kazakova O., Carlotti G. et al. Spin-Wave Spectra in Nanometric El-

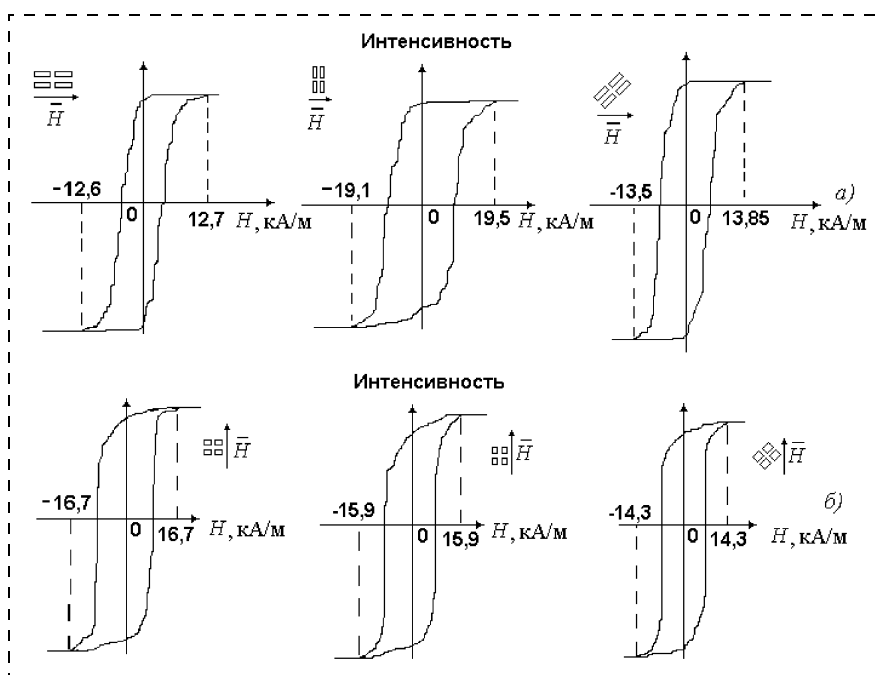


Рис. 8. Вид петель гистерезиса при $\theta = 0^\circ$, 90° и 45° для решетки типа 1 (а) и типа 2 (б)

lptical Dots Arrays // IEEE Transaction on Magnetics. 2003. Vol. 39. N 5. P. 2750—2752.

6. Jung S., Watkins B., DeLong L. et al. Ferromagnetic resonance in periodic particle arrays // Physical Review B. 2002. Vol. 66. P. 132401.

7. Kakazei G. N., Wigen P. E., Guslienko K. Yu. et al. In-plane and out-of-plane uniaxial anisotropies in rectangular arrays of circular dots studied by ferromagnetic resonance // Journal of Applied Physics. 2003. Vol. 93(10). P. 8418—8420.

8. Высоцкий С. Л., Джумалиев А. С., Филимонов Ю. А. Исследование ультратонких пленок Fe/GaAs(100) методом ферромагнитного резонанса // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45. № 2. С. 209—213.

9. Damon R. W. and Eshbach J. R. Magnetostatic modes of ferromagnetic slab // J. Phys. Chem. Sol. 1961. Vol. 19. N 3/4. P. 308—320.

10. Joseph R. I., Schlomann E. Demagnetizing field in nonellipsoidal bodies // Journal of Applied Physics. 1965. Vol. 36. N 5. P. 1579—1593.

11. De Wames R. E., Wolfram T. Dipole-exchange spin waves in ferromagnetic films // Journal of Applied Physics. 1970. Vol. 41. N 3. P. 987—992.

12. Гуляев Ю. В., Бугаев А. С., Зильберман П. Е. и др. Гигантские осцилляции прохождения квазиповерхностной спиновой волны через тонкую пленку железитриевого граната (ЖИГ) // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30. Вып. 9. С. 600—603.

13. Высоцкий С. Л., Казаков Г. Т., Маряхин А. В., Филимонов Ю. А. Объемные магнитостатические волны в обменно-связанных ферритовых пленках // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 7. С. 97—110.

14. Prinz G. A., Rado G. T., and Krebs J. J. Magnetic properties of single-crystal {110} iron films grown on GaAs by molecular beam epitaxy // Journal of Applied Physics. 1982. Vol. 52(3). P. 2087—2091.

15. Temiryazev A. G. MFM study and computer simulation of domain structures in Permalloy elements // Abstracts of International Conference ICMNE-2003. P. 1—43.

16. Червинский М. М., Глаголев С. Ф., Архангельский В. Б. Методы и средства измерений магнитных характеристик пленок. Л.: Энергоатомиздат, 1990.

УДК 621.3

В. В. Старков, канд техн. наук, **Е. Ю. Гаврилин**, **А. Ф. Вяткин**, д-р физ.-мат. наук, Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, г. Черноголовка Московской области

ИССЛЕДОВАНИЕ НУКЛЕАЦИОННОЙ СТАДИИ ПРОЦЕССА АНОДНОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

Исследуются особенности нуклеационной стадии глубокого анодного травления кремния. Установлена зависимость глубины образовавшегося кратера травления для образцов кремния р-типа проводимости с различным удельным сопротивлением от режимов проведения процессов анодного травления. На основе полученных экспериментальных данных объясняется "bottleneck" эффект, который наблюдался не только на первой, но и на второй стадии роста пор.

Введение

Образование системы макропор в полупроводниках с использованием электрохимического травления стало в последние годы предметом интенсивных исследований. Это объясняется, прежде всего, практически важным применением макропористого кремния в различных технологиях. Примером тому могут служить пористые фольги на основе кремния, мембраны, газовые анализаторы, использование пористого кремния для изоляции активных элементов современных интегральных микросхем. Кроме указанных приложений, пористый кремний с диаметром поры в диапазоне от долей микрометра до десятков нанометров обладает огромным потенциалом в качестве материала для

оптоэлектроники. К числу устройств, основанных на свойствах данного материала, можно отнести всю гамму приборов, имеющих общее название — фотонные кристаллы [1]. Немаловажной особенностью этих приборов является возможность интеграции соответствующих оптоэлектронных устройств с уже существующими электронными приборами.

Одним из характерных явлений, происходящих на начальной стадии глубокого анодного травления (ГАТ), является уменьшение толщины травимого материала в месте травления с образованием своеобразного кратера травления. Из ряда работ, в которых проводилось определение влияния режимов глубокого анодного травления на глубину кратера, можно выделить работу [2] по изучению фотоэлектрохимического травления кремния *n*-типа проводимости. Установлено, что глубина кратера монотонно увеличивалась с ростом заряда, прошедшего через единицу поверхности травимого образца. Это наблюдалось как для сильно легированных, так и для слабо легированных образцов, причем для слабо легированных образцов глубина кратера была существенно ниже. В работе [3] получены результаты, которые свидетельствуют о том, что с увеличением времени ГАТ наблюдается насыщение на зависимости глубины кратера от времени травления. Кроме того, максимальная глубина кратера для слабо легированных образцов ниже, чем для более сильно легированных образцов. Полученные различия можно объяснить тем, что авторы работы [2] осуществляли освещение образца с лицевой стороны, в то время как авторы работы [3] проводили подсветку образцов с тыльной стороны пластины. Образовавшийся пористый слой на дне кратера представлял собой двухслойную композицию из нанопористого и микропористого кремния. В связи с тем, что нанопористый крем-

ний образовался над слоем микропористого кремния, резонно предположить, что дополнительное травление нанопористого кремния во время анодного травления могло привести к повышенным значениям глубины кратера и отсутствию насыщения на зависимости глубины кратера от заряда [2].

Режим фотоанодного травления, который использовали авторы в работе [3], предполагал постоянство интенсивности подсветки тыльной стороны образца. Однако сила тока травления, которая может существенно влиять на кинетику нуклеационной стадии, при одинаковой интенсивности подсветки существенным образом может зависеть от состояния (дефектности) поверхности обратной стороны пластины, а также от диффузионной длины неосновных носителей заряда в кремнии. Известно, что рекомбинационные характеристики могут существенно различаться для различных образцов и, в частности, для образцов с различной степенью легирования.

Для устранения особенностей влияния способа подсветки образца, а также рекомбинационных характеристик поверхности и объема кремния на результаты эксперимента целесообразно использовать кремний p -типа проводимости, при формировании пористой структуры в котором отпадает необходимость в применении дополнительной подсветки. В предлагаемой работе исследуется зависимость глубины образовавшегося кратера для образцов кремния p -типа проводимости с различным удельным сопротивлением от режимов проведения процесса ГАТ.

Экспериментальная часть

Определение глубины кратера. Для определения в дальнейших рассуждениях глубиной кратера будем называть разность по толщине кремниевой пластины в области анодного травления и в области, где травление не проводилось [2, 3]. Как было показано в работе [4], процесс ГАТ включает в себя две стадии. Оптимальное расположение затравочных центров, в качестве которых выступают V-канавки, полученные щелочным травлением, позволяет полностью исключить из процесса ГАТ первую стадию [5]. Эксперименты по определению толщины пластины в области формирования упорядоченной структуры пор, сформированных с помощью ГАТ [5], показали, что в этом случае формирование кратера не наблюдается. На основании этих данных нами предложена методика определения глубины кратера, которая основана на одновременном анодном травлении областей с V-канавками и исходно не структурированной поверхности пластины. В результате процесса ГАТ в области V-канавок формируется упорядоченная структура пор (отсутствует нуклеационная стадия процесса), а в неструктурированной области формируются

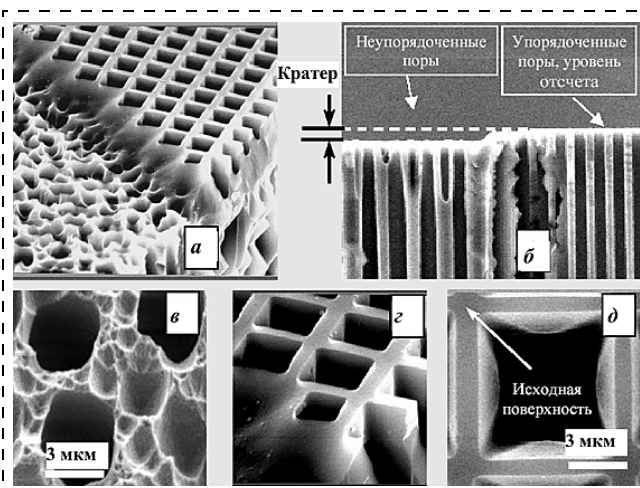


Рис. 1. Методика определения глубины кратера, возникающего на первой стадии формирования неупорядоченных пор с помощью глубокого анодного травления

мируются неупорядоченные поры (рис. 1). При этом, как отчетливо видно на рис. 1, в, в областях между глубокими порами на поверхности образца расположено большое число углублений, которые не сформировались в качестве нуклеационных центров для последующего роста пор. В случае упорядоченного роста пор в областях между глубокими порами поверхность практически не отличается от полированной поверхности исходной пластины (рис. 1, г, д). Этот экспериментальный факт можно рассматривать в качестве дополнительного подтверждения того, что в области упорядоченных пор в процессе ГАТ не только отсутствовала нуклеационная стадия процесса, но и не наблюдалось травление поверхности.

Если за уровень отсчета выбрать уровень расположения упорядоченных пор, то глубину кратера для такого образца можно определить по разности между этим уровнем и уровнем расположения неупорядоченных пор (рис. 1, а, б).

Глубокое анодное травление кремниевых пластин. Для экспериментов использовался кремний p -типа проводимости с удельным сопротивлением ρ от 5 до 1000 Ом·см. Ориентация поверхности (100). Структура инверсных пирамид на поверхности кремния формировалась методами фотолитографии и последующего селективного травления в КОН. Линейный размер основания V-образных пирамид варьировался от 5 до 100 мкм. ГАТ осуществлялось в растворе 49 %-ной плавиковой кислоты в диметилформамиде (ДМФ) или спирте с водой. Изучение начальной стадии процесса проводилось посредством варьирования плотностью анодного тока травления, временем ГАТ, а также объемным сопротивлением образца. Плотность анодного тока j изменялась в пределах от 2 до

15 мА/см², время травления от 5 мин до 4 ч. Травление осуществлялось в режиме генератора тока.

Обсуждение полученных результатов

На рис. 2 представлены зависимости глубины кратера от времени травления образцов с $\rho = 7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Травление осуществлялось в растворе $\text{HF}:\text{DMF} = 1:9$, при комнатной температуре и различных значениях плотности тока. Видно, что в процессе обработки образца толщина слоя, стравленного на начальной стадии, увеличивается со временем. Однако по достижении некоторой глубины кратера стадия нуклеации заканчивается, и при дальнейшем повышении времени травления глубина кратера не увеличивается. При этом происходит дальнейший рост глубины пористого слоя. Как следует из данных, приведенных на рис. 2, изменение плотности анодного тока не влияет на значение глубины кратера, а лишь сдвигает время окончания нуклеационной стадии. Необходимо отметить, что при проведении экспериментов глубина кратера также не меняется при изменении размера V-образной канавки, используемой для формирования упорядоченных областей на поверхности кремния.

Влияние значения удельного сопротивления кремния на глубину кратера оценивалось посредством травления образцов с $\rho = 7, 20, 45$ и $1000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ в растворе $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:(\text{CH}_3)_2\text{СНОН} = 5:25:9$ в течение 100 мин. Плотность анодного тока травления составляла 10 мА/см^2 . Данные, полученные в результате этого эксперимента, представлены на рис. 3. На вставке приведена аналогичная зависимость, полученная по экспериментальным результатам работы [3], для кремния *n*-типа при фотоанодном травлении в режиме постоянной интенсивности подсветки и потенциале смещения 3 В. Как видно, с увеличением удельного сопротивления для кремния *p*-типа глубина кратера монотон-



Рис. 2. Изменение глубины кратера от времени ГАТ кремния *p*-типа проводимости при различных значениях анодного тока травления

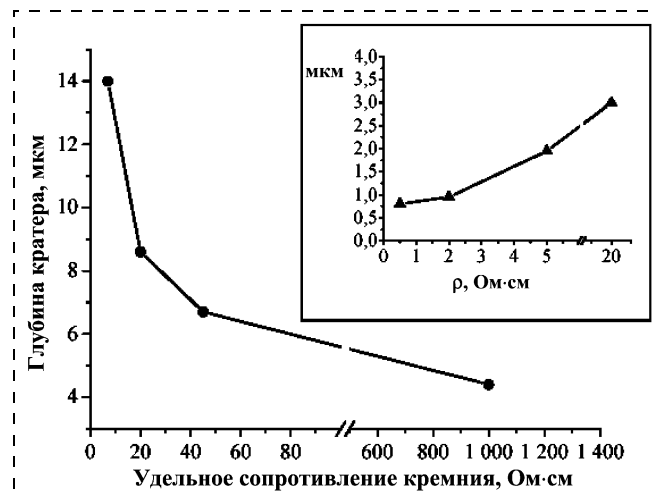


Рис. 3. Влияние значения удельного сопротивления кремния *p*-типа на глубину кратера. На вставке та же зависимость, построенная по данным работы [3], для кремния *n*-типа

но уменьшается. Для кремния *n*-типа эта зависимость обратная.

Кинетика нуклеационной стадии ГАТ существенно зависит от состава применяемого раствора для травления. В таблице представлены экспериментальные результаты, характеризующие значения глубины кратера при использовании в процессе ГАТ кремния *p*-типа с удельным сопротивлением 20 и 7 Ом·см и различных растворов для травления. Видно, что состав раствора значительно влияет на глубину формируемого кратера. Так, например, для кремния с $\rho = 7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ глубина кратера составляет 2 мкм при травлении в растворе плавиковой кислоты в диметилформамиде и 14 мкм при травлении в растворе плавиковой кислоты в водном растворе изопропилового спирта.

В работе [3] дано феноменологическое описание процесса образования затравочных центров на поверхности кремния и дальнейшего их развития в глубокие поры. В представленной модели приповерхностная область кремния последовательно проходит три стадии: фазу нуклеации затравочных центров, фазу перераспределения тока между образовавшимися затравочными центрами и фазу стабильного травления пор по глубине. Авторы работы рассматривают фазу перераспределения тока как переходную между фазой нуклеации затравочных центров и фазой стабильного роста пор. То есть в течение этого времени в образце полностью проходят процессы, ответственные за перераспределение тока между растущими порами. В результате по окончании фазы перераспределения тока одна часть затравочных центров останавливается в своем развитии, а другая продолжает рост по глубине. Таким образом, перераспределение тока, по мнению авторов, должно характеризовать оконча-

Значение глубины кратера при ГАТ кремния с разным удельным сопротивлением для различных растворов на основе плавиковой кислоты

Раствор	Глубина кратера, мкм	
	$\rho = 20$ Ом·см, $j = 20$ мА/см ²	$\rho = 7$ Ом·см, $j = 9$ мА/см ²
HF:H ₂ O:DMF = 5:7:2	3,5	—
HF:H ₂ O:(CH ₃) ₂ CHOH = 5:6:29	8	—
HF:H ₂ O:C ₂ H ₅ OH = 5:6:10	18	—
HF:H ₂ O:C ₂ H ₅ OH = 1:5:2	20	—
HF:DMF = 1:9	—	2
HF:H ₂ O:(CH ₃) ₂ CHOH = 5:25:9	—	14

ние процесса формирования кратера, возникающего в процессе ГАТ. Однако экспериментальные результаты, полученные нами, свидетельствуют о том, что перераспределение тока травления может происходить не только на нуклеационной стадии, но и на стадии стационарного роста пор. На рис. 4 представлены микроскопические изображения скола кремниевой пластины с $\rho = 400$ Ом·см, полученные в результате ГАТ в растворе HF : H₂O : (CH₃)₂CHOH = 5 : 25 : 9 при постоянной температуре (20,5 °С) и плотности тока травления $j = 12$ мА/см² в течение 100 мин. На обратной стороне пластины формировался омический контакт, включающий тонкий подслои Al толщиной 15 нм и слой Pd толщиной 700 нм. Контактная система подвергалась 20 мин отжигу при 450 °С в атмосфере водорода. Рис. 4, а демонстрирует часть переходной области между расположенной слева упорядоченной структурой пор (фрагмент области при большем увеличении — рис. 4, б) и расположенной справа неупорядоченной структурой пор (большее увеличение — рис. 4, в). Толщина пористого слоя

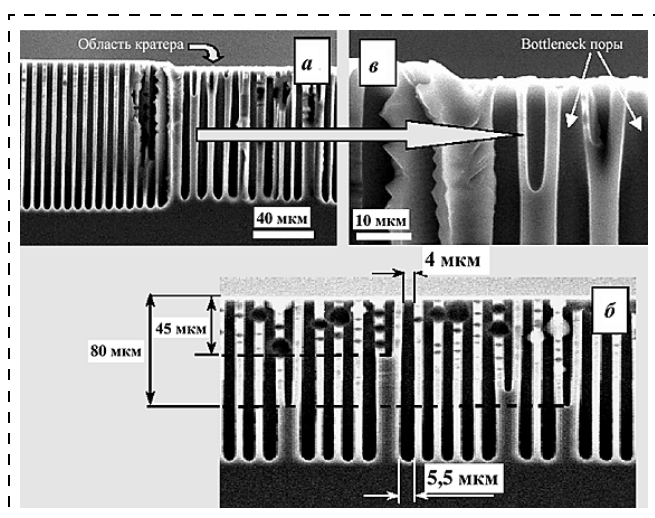


Рис. 4. Явление перераспределения анодного тока в процессе второй стадии травления. Образование "bottleneck" пор

в области упорядоченных пор составляет 145 мкм, а в области неупорядоченных пор 117 мкм. Как видно из фрагмента упорядоченной структуры на рис. 4, б, часть пор в этой области имеет существенно меньшую глубину. При этом соседние поры, прилегающие к укороченным порам, увеличиваются в диаметре (эффект бутылка образности — "bottleneck effect" [3]). Аналогичный эффект наблюдается и в области кратера, где расположены неупорядоченные поры (рис. 4, в). Наблюдаемое объясняется тем, что в условиях травления при критически малой плотности тока происходит перехват (перераспределение) части тока соседними порами. При этом на стадии глубокого роста пор увеличение тока приводит к увеличению диаметра соответствующих пор [5], что и объясняет "bottleneck" эффект.

Выводы

В работе предложена методика, позволяющая осуществлять исследование глубины кратера из анализа SEM-изображений поперечных сколов образцов, полученных в результате проведения ГАТ.

Проведено исследование зависимости начальной стадии от времени и режимов глубокого анодного травления для кремния *p*-типа проводимости. Установлено, что в процессе обработки образца толщина слоя, стравленного на первой стадии, увеличивается со временем. Однако по достижении критической толщины первая стадия заканчивается. Глубина кратера не изменяется, а дальнейшее увеличение времени обработки приводит к росту глубины создаваемых макропор.

Показано, что явление перераспределения анодного тока травления может происходить не только на первой стадии анодного травления. Поэтому такое явление нецелесообразно выделять как отдельную стадию в процессе ГАТ. Подтверждается предложенная ранее модель анодного травления кремния как двухстадийного процесса. При этом окончанием стадии нуклеации процесса ГАТ может являться момент окончания процессов формирования кратера при самопроизвольном формировании структуры пор на поверхности.

Список литературы

1. Krauss T. F., De La Rue R. M. Photonic crystals in the optical regime — past, present and future // Progress in Quantum Electronics. 1999. N 23. P. 51—96.
2. Levy-Clement C., Lagoubi Abdelghani, Tomkiewicz M. Morphology of porous *n*-type silicon obtained by photoelectrochemical etching // Journal of Electrochemical Society. 1994. V. 141 (4). P. 958—967.
3. Al Rifai M. Hejjo, Christophersen M., Ottow S., Carstensen J., Foll H. Dependence of macropore formation in *n*-Si on potential, temperature, and doping // Journal of Electrochemical Society. 2000. V. 147 (2). P. 627—635.
4. Vyatkin A., Starkov V., Tzeitlin V., Presting H., Konle J., König U. Random and ordered macropore formation in *p*-type silicon // Journal of Electrochemical Society. 2002. V. 149(1). G70—G76.
5. Starkov V. V. Ordered macropore formation in silicon // Phys. stat. sol. (a). 2003. N 197 (1). P. 22—26.

УДК 621.382.3

С. Г. Новиков, канд. техн. наук,
Н. Т. Гурин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Ульяновский государственный университет

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ АНАЛОГИ СИММЕТРИЧНЫХ НЕГАТРОНОВ

Рассмотрены методы и принципы построения схемотехнических аналогов симметричных негатронов. Реализация симметричной вольт-амперной характеристики в рассмотренных аналогах достигается за счет встречно-последовательного, встречно-параллельного и интегрированного включения однополярных негатронов. Проведено моделирование полученных схем с помощью пакета DesignLab Eval 8.

Многослойные полупроводниковые приборы с положительной обратной связью, обладающие уникальными электрофизическими свойствами и функциональными особенностями [1], находят все новые применения в различных узлах современной бытовой, специальной, микросистемной техники, автомобильной электронике и т. п. Наличие в многослойном полупроводниковом приборе положительной обратной связи по току или по напряжению предполагает возникновение либо отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), либо отрицательной проводимости (ОДП). Приборы с ОДС [2] в настоящее время применяются в качестве микромощных переключателей и датчиков в составе интегральных схем, высокомощных ключей, коммутирующих напряжения в сотни тысяч вольт и токи до тысяч ампер.

В отличие от приборов с ОДС многослойные приборы с ОДП, имеющие N -образную вольт-амперную характеристику (ВАХ), нашли пока ограниченное применение лишь в узлах генераторов и дискретных элементов защиты. К приборам этого класса относятся различные типы полупроводниковых негатронов, такие как N -транзистор, бинистор, λ -транзистор и др. [3–5], а также их схемотехнические аналоги [6, 7]. При этом разработкам многослойных полупроводниковых приборов с ОДП средней и большой мощности, а также приборам с симметричными N -образными характеристиками уделяется гораздо меньшее внимание, чем однополярным или симметричным приборам с ОДС. Однако все чаще приборы с ВАХ N -типа находят применение в качестве мощных генераторов, коммутаторов в узлах автомобильной электроники, а также в качестве ограничителей и переключате-

лей в цепях переменного тока. Приборы с N -образными ВАХ могут использоваться в качестве защитных элементов в узлах электронной аппаратуры — самовосстанавливающихся предохранителей, работающих на переменном токе, элементов интегрированной защиты в составе мощных полупроводниковых приборов [8], датчиков различных полей и излучений, а также в качестве элементов в схемах многоуровневой логики, в узлах микросистемной техники и телефонии. Таким образом, разработка новых полупроводниковых приборов с ОДП и особенно приборов с симметричными N -образными ВАХ является актуальной.

При проектировании многослойных полупроводниковых приборов с симметричными ВАХ N -типа различного уровня мощности следует уделить внимание схемотехническим подходам, используемым для организации положительной обратной связи, приводящей к возникновению ОДП. Известно, что большинство приборов с ОДП можно представить в виде схемотехнического аналога, моделирующего "внутреннюю" обратную связь [1]. Также возможен и обратный процесс, заключающийся в синтезе схемотехнического аналога, в котором проектируемая структура представляется в виде транзисторных эквивалентов [7, 9], и в дальнейшей реализации этой схемы в интегральном виде в объеме полупроводника.

Специфику организации положительной обратной связи в схемотехнических аналогах негатронов можно представить в виде четырех универсальных схем, где в качестве элементов использованы: биполярные транзисторы разных типов проводимости; полевые транзисторы с управляющими p – n -переходами и разными типами каналов; полевые транзисторы с изолированными затворами.

Остановимся подробнее на рассмотрении данных вариантов схемотехнических аналогов негатронов.

Первая из представленных схем (рис. 1) характеризует принцип положительной обратной связи, основанный на модуляции управляющего воздействия для основного элемента посредством вспомогательного элемента. Одной из наиболее известных реализаций этого принципа является биполярно-полевой негатрон (рис. 1, а) [6, 7]. Цепь положительной обратной связи по напряжению в этой схеме образована полевым транзистором, включенным между электродами коллектора K и базы B биполярного транзистора. При этом биполярный транзистор включен по схеме с общим эмиттером $\mathcal{E}$. Данная схема управляется напряжением, и семейство ВАХ в зависимости от управляющего воз-

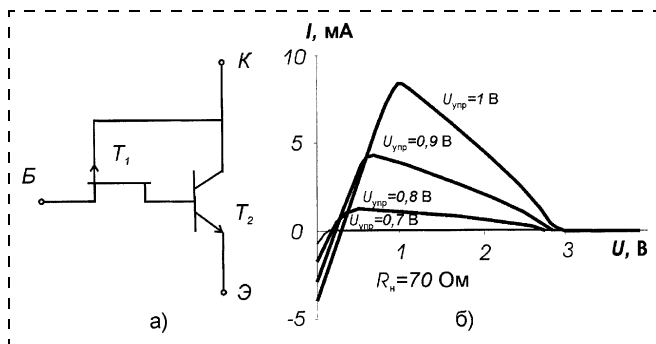


Рис. 1. Схема биполярно-полевого негатрона, реализующая принцип положительной обратной связи, основанный на модуляции управляющего воздействия (а), и семейство его ВАХ (б); R_n — сопротивление нагрузки

действия, представлено на рис. 1, б. Принцип работы таких приборов подробно описан в [6].

Вторая схема основана на использовании эффекта шунтирования основного элемента посредством дополнительного элемента, управляемого выходным сигналом. На рис. 2, а приведена схема биполярно-полевого негатрона на основе сочетания биполярного транзистора и МОП-транзистора с индуцированным каналом, реализующая этот принцип. Для получения участка отрицательной проводимости (рис. 2, б) необходимо в качестве управляющего источника использовать источник тока. Подробное описание работы таких схем приведено в работе [6].

Третья схема характеризует организацию положительной обратной связи посредством нагрузочного элемента, включенного последовательно с основным элементом и управляемого выходным сигналом. Пример схемы биполярно-полевого негатрона, реализующей данный принцип, приведен на рис. 3, а, а семейство ВАХ — на рис. 3, б. Кроме того, на базе этого принципа можно реализовать схему λ -диода — двухэлектродного прибора с N -образной характеристикой [7].

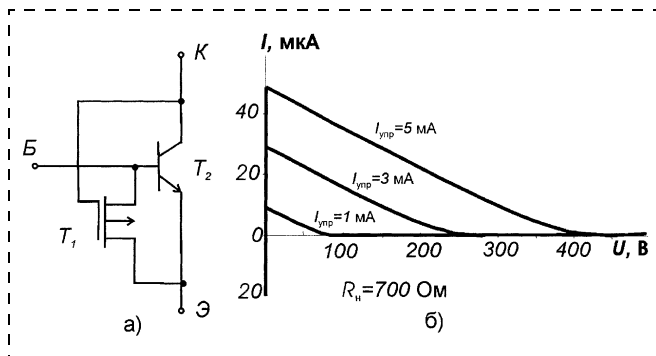


Рис. 2. Схема биполярно-полевого негатрона, реализующая принцип положительной обратной связи, основанный на шунтировании (а), и семейство его ВАХ (б); R_n — сопротивление нагрузки

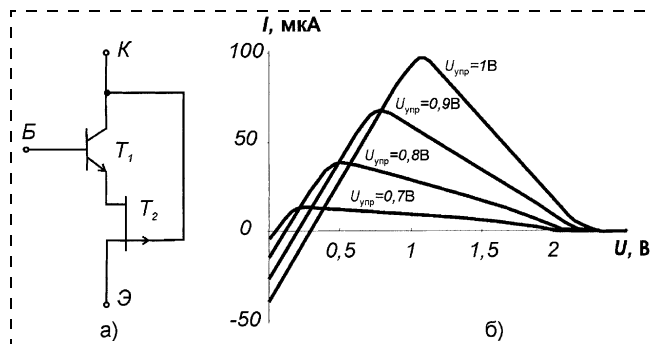


Рис. 3. Схема биполярно-полевого негатрона, реализующая принцип положительной обратной связи, основанный на модуляции нагрузки (а), и семейство его ВАХ (б)

Четвертая схема — каскадное включение дополнительного элемента в цепь управления основным элементом. Схема, демонстрирующая данный принцип, приведена на рис. 4, а.

Рассмотренные принципы построения схемотехнических аналогов негатронов предполагают использование в качестве составляющих элементов следующие:

- биполярные транзисторы;
- полевые транзисторы с управляющими $p-n$ -переходами и разными типами каналов;
- полевые транзисторы с изолированными затворами и разными типами каналов;
- комбинации различных транзисторов с дополнительно включенными диодами.

Различные комбинации элементов позволяют построить около 40 трехэлектродных схем с ВАХ N -типа. В зависимости от выбора элементной базы будут варьироваться все основные параметры ВАХ и значения ОДП.

На основе рассмотренных схем также возможно построение двухэлектродных негатронов, в том числе с дополнительными резистивными делителями в управляющей цепи.

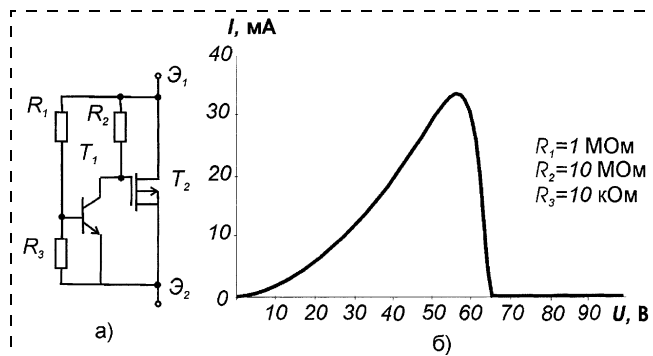


Рис. 4. Схема биполярно-полевого негатрона, реализующая принцип положительной обратной связи на базе каскадного включения элементов (а), и его ВАХ (б)

Все рассмотренные выше схемы предназначены для работы в электрических цепях при одной полярности питающего напряжения.

Для решения задачи построения схмотехнических аналогов симметричных негатронов можно использовать рассмотренные схемы, работающие при одной полярности напряжения и тока, совместно со схемами встречно-последовательного, встречно-параллельного и интегрированного включения негатронов.

На базе перечисленных методов синтезировано около 100 схем аналогов симметричных негатронов. Далее приведены результаты наиболее интересных решений, отвечающих следующим критериям:

- высокое значение отрицательного сопротивления;
- малые значения напряжений пика и напряжений минимума;
- отсутствие вторичной положительной ветви на ВАХ;
- возможность и технологическая простота интеграции в объеме полупроводника.

Моделирование синтезированных схем осуществлялось с помощью пакета DesignLabEval 8. Все транзисторы и диоды были взяты из библиотеки стандартных моделей компонентов этого пакета без изменения параметров.

В итоге получены негатроны с симметричными ВАХ, многие из которых не имеют вторичных положительных ветвей в области рабочих напряжений питания, обладают малыми напряжениями пика и впадины, а также высокими значениями токов пика и отрицательной проводимости. Примеры реализации двухэлектродных симметричных негатронов на базе различных принципов приведены на рис. 5–8.

Использование схемы встречно-последовательного включения негатронов предполагает наличие низкого сопротивления в обратной полярности включения исходной схемы негатрона. При соблюдении этого условия при любой полярности питающего напряжения будет работать один негатрон, а второй будет выступать в качестве низкоомной, последовательно включенной нагрузки.

Схема, построенная на базе встречно-последовательного включения негатронов с модуляцией нагрузки, и ее ВАХ приведены на рис. 5. Схема обладает отрицательным сопротивлением порядка 10 МОм, и потребляемая мощность в открытом состоянии составляет 250 мкВт. Поскольку в качестве моделей составляющих транзисторов были взяты транзисторы малой мощности, схема не обладает высокими значениями токов пика. Кроме составляющих транзисторов схема не имеет других элементов, что позволяет реализовывать такие приборы в интегральном исполнении.

Использование схемы встречно-параллельного включения негатронов возможно при наличии в

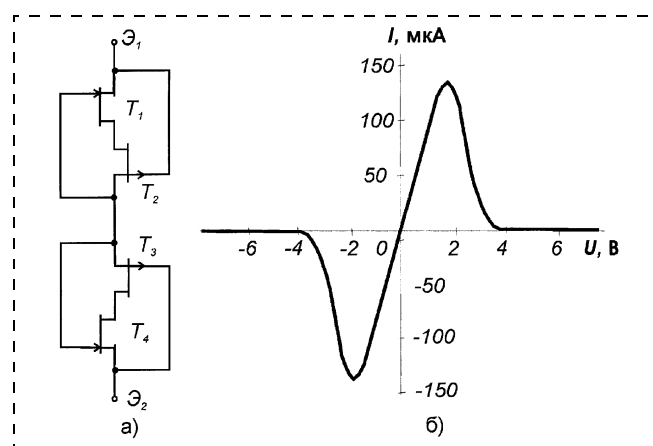


Рис. 5. Схема встречно-последовательного включения негатронов (а) и ее симметричная ВАХ (б)

обратной полярности напряжения питания высокого сопротивления. В этом случае негатрон, работающий при одной полярности питающего напряжения, шунтируется высоким сопротивлением второго негатрона. Схема, демонстрирующая этот принцип, приведена на рис. 6. Для получения высокого сопротивления, шунтирующего открытый негатрон, применены резисторы R_1 – R_4 , также выполняющие функции делителей напряжения в управляющих цепях. Данная схема обладает невысокими значениями тока пика, высокими значениями напряжений пика и минимума, а также невысоким отрицательным сопротивлением.

В случае использования в качестве составляющих элементов биполярно-полевых негатронов с транзисторами разных типов и разными каналами возможно построение параллельной схемы. Пример реализации такого включения приведен на рис. 7.

Использование интегрированного включения негатронов возможно в случае синтеза схем с "внутренней положительной обратной связью" за счет взаимной функциональной интеграции отдельных негатронов или схем. Кроме того, по этому принципу можно создать приборы, имеющие в

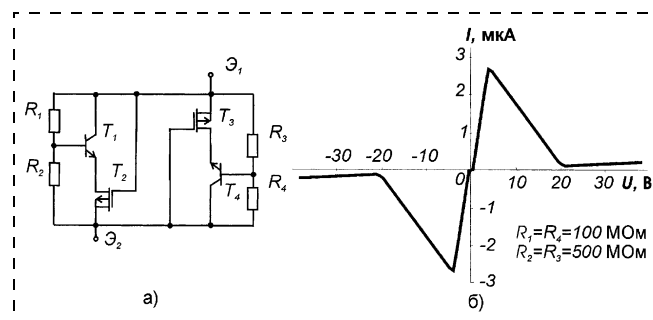


Рис. 6. Схема встречно-параллельного включения негатронов (а) и ее симметричная ВАХ (б)

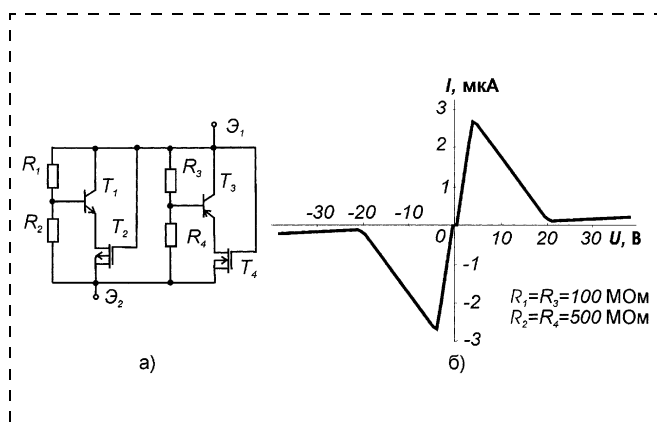


Рис. 7. Схема параллельного включения негатронов (а) и ее симметричная ВАХ (б)

прямой и обратной ветви характеристики разных типов (например, S -характеристика в прямой ветви, и N -характеристика в обратной).

Схема, построенная на базе интегрированного включения негатронов с модуляцией нагрузки, и ее ВАХ приведены на рис. 8. По сравнению с первой схемой (см. рис. 5) здесь исключен один из составляющих транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом, добавлены токоограничивающие резисторы в цепи затворов двух крайних транзисторов и введены диоды в цепь затвора среднего транзистора. Диоды обеспечивают смену полярности управляющего напряжения на затворе транзистора T_2 . ВАХ этой схемы представлена на рис. 8, б. Схема обладает отрицательным сопротивлением порядка 10 МОм и потребляемая мощность в открытом состоянии составляет 250 мкВт. Несмотря на то, что в схеме присутствуют дополнительные элементы, ее реализация в интегральном исполнении также возможна за счет реализации диодов в активных областях дополнительных транзисторов и пленочных или полупроводниковых резисторов.

Проведенные исследования предложенных схемотехнических аналогов приборов с симметричными N -образными ВАХ подтвердили правильность выбранного направления проектирования схем, а в дальнейшем — и полупроводниковых структур приборов такого типа. Кроме этого, предложенные схемы могут широко использоваться в различных узлах современной радиоэлектронной аппаратуры, работающей на переменном токе в качестве ус-

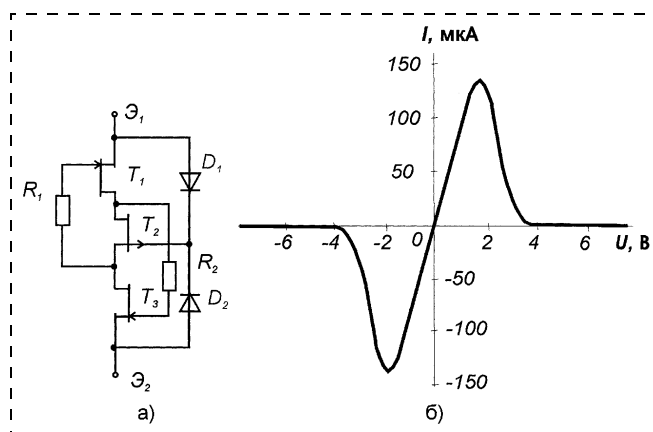


Рис. 8. Схема интегрированного включения негатрона (а) и ее симметричная ВАХ (б)

ройств защиты и управления индуктивной нагрузкой. Достоинствами схемы являются малое число элементов, возможность реализации в интегральном виде, а также реализация приборов в широком диапазоне мощностей.

Список литературы

1. Гаряинов С. А., Абезгауз И. Д. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением. М.: Энергия, 1970. 320 с.
2. Блехер А. Физика тиристоров: Пер. с англ. Л.: Энергоиздат, 1981. 264 с.
3. Филинук Н. Негатроника. Исторический обзор // МОО "Наука и Техника". (<http://www.n-t.ru/tp/in/nt.htm>)
4. Негатроника / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, С. А. Гаряинов и др. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 315 с.
5. Гаряинов С. А., Тиходеев Ю. С. Физические модели полупроводниковых приборов с отрицательным сопротивлением. М.: Радио и связь, 1997. 276 с.
6. Галузо В. Е., Матсон Э. А., Мельничук В. В. Полупроводниковые биполярно-полевые структуры // Зарубежн. электрон. техника. 1981. № 10 (244). 50 с.
7. Chua L. O., Yu J., Yu Y. Bipolar-JFET-MOSFET Negative Resistance Devices // IEEE. Transactions on Circuits and Systems. 1985. N 1. P. 46–61.
8. Пат. РФ № 2175461, 1998. Интегральный транзистор с защитой от перенапряжений / А. Ю. Новоселов, Н. Т. Гурин, С. Б. Бакланов, С. Г. Новиков, А. И. Гордеев, А. Ф. Королев, Ю. Д. Обмайкин.
9. Новиков С. Г., Новоселов А. Ю., Бакланов С. Б., Гуринов Н. Т. Схемотехническое моделирование и исследование мощных N -транзисторов // Изв. вузов. Электрон. 1999. № 1. С. 86–90.

УДК 621.383

С. Г. Бондаренко,
М. М. Векшин, канд. физ.-мат. наук,
О. А. Кулиш, Н. А. Яковенко, д-р техн. наук,
Кубанский государственный университет,
г. Краснодар

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛИТЕЛЬ ТЕ- И ТМ-ВОЛН НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВУХЛУЧЕВОГО ВОЛНОВОДНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Предложена и рассчитана новая конструкция оптического поляризационного расщепителя волноводных мод на основе двухлучевого интерферометра Маха — Цендера. Принцип работы схемы основан на поляризационно-зависимом сдвиге фаз направленных волн при прохождении обоих плеч интерферометра. Одно плечо интерферометра включает в себя металлодиэлектрический волновод с подобранными параметрами.

В микрооптических и волоконно-оптических системах сбора/обработки информации применяются расщепители поляризаций, позволяющие разделить различные поляризационные компоненты излучения в пространстве. Применение интегрально-оптических схем вместо волоконных или объемных аналогов для работы в составе таких систем позволяет создавать надежные многоканальные устройства. Поэтому актуальными являются исследования в области разработки компактных интегрально-оптических расщепителей поляризации.

Известные интегрально-оптические расщепители поляризации создаются на основе следующих физических принципов: эффекта модовой селекции в асимметричных Y-разветвителях [1, 2] и резонансной связи оптических волн, реализуемой в устройствах на основе диэлектрических направленных ответвителей.

Использовать направленную связь двух световых волн для разделения поляризаций можно двумя способами. При первом способе учитывается тот факт, что у направленных ответвителей, образованных различными по параметрам каналами, длина связи для ТЕ- и ТМ-мод также различная. Следовательно, можно подобрать длину связи так, чтобы развести ТЕ- и ТМ-волны по разным каналам. Способы практической реализации основаны на разработке волноводных структур, у которых разнесение констант распространения ТЕ- и ТМ-

мод было бы существенным для эффективной развязки между поляризациями [3, 4].

Другой способ применения направленных ответвителей для реализации пространственного разнесения поляризационных компонентов излучения основан на особенностях интерференции двух сигналов, проходящих через ответвитель. Известно, что наличие или отсутствие выходного сигнала на том или ином выходе ответвителя определяется соотношением фаз сигналов, поданных на его вход. При входных синфазных сигналах происходит 100 %-ный вывод мощности оптической волны в выходной порт "1". Если сигналы на входе находятся в противофазе, сигнал выходит в противоположный по отношению к предыдущему случаю выходной канал — в порт "2".

В целях создания устройства для разделения поляризаций данную разность фаз можно организовать на основе двухлучевого интерферометра Маха—Цендера, в котором временная задержка прохождения двух плеч была бы поляризационно чувствительна. То есть для одной из поляризаций сигналы после прохождения обоих плеч были бы синфазны, а для другой поляризации аналогичные сигналы находились бы в противофазе. Таким образом, по меньшей мере одно из плеч интерферометра должно обладать выраженным модовым двулучепреломлением. Существуют несколько научных исследований, в которых описывается экспериментальная реализация описанного выше принципа. В качестве анизотропного материала, определяющего поляризационные характеристики всего устройства в целом, используется нитрид кремния, из которого формируется часть волноводного слоя в одном из плеч [5].

Способ использования составного волновода с разнотипными материалами сердцевин является технологически сложным, так как в случае рассогласования волноводных мод в состыкованных друг с другом каналах, имеющих различные параметры, возникают потери мощности, что, во-первых, приводит к потерям мощности всей схемы, а во-вторых, направленные волны разной амплитуды на входе ответвителя обязательно приведут к неполной перекачке энергии из канала в канал. Разумным представляется поиск других механизмов формирования модового двулучепреломления, достаточно простых в реализации и потенциально воспроизводимых в различных технологиях волноводной оптоэлектроники. Нами были рассмотрены различные методы формирования модовой анизотропии, которые могли бы быть использованы в указанных целях. Особое внимание было уделено особенностям распространения направленных волн в металлодиэлектрических слоистых средах. Известно, что интегрально-оптические металлоди-

электрические волноводы обладают высокими поляризующими свойствами и на их основе создают эффективные ТЕ-поляризаторы. Для усиления поляризующих свойств между волноводным каналом и металлической пленкой вводится тонкий буферный диэлектрический слой для обеспечения условий передачи энергии волноводной моды затухающей плазмонной волне. Данный вопрос в специальной литературе освещен достаточно широко [6].

Однако малоизученным оказался вопрос влияния металлических слоев на действительную составляющую константы распространения. Вероятно это можно объяснить тем, что подбор условий эффективной резонансной связи (фазового синхронизма) моды диэлектрического волновода с плазмонной волной проводился именно для создания поляризационных фильтров, выделяющих определенную поляризационную составляющую оптического излучения и подавляющую ортогональную ей. Волноводные датчики химико-биологических реагентов, активно разрабатываемые в последнее время [7], также используют особенности поглощения ТМ-поляризованных мод.

Проведенное нами исследование позволило предложить новый и простой вариант пространственного разделения поляризации на основе асимметричного интерферометра Маха—Цендера (рис. 1). Модовая анизотропия формируется за счет нанесения металлической пленки через буферный слой на поверхность волновода для организации указанного выше различия времени прохождения ТЕ- и ТМ-мод в одном плече. То есть в данном случае анизотропия обусловлена не свойствами материала волновода, а влиянием покровной металлической среды. Для доказательства работоспособности такой конструкции проведено исследование влияния тонких металлических пленок на действи-

тельную часть константы распространения волноводных мод ТЕ- и ТМ-поляризаций и оценены вносимые потери. Общий принцип работы предлагаемого устройства не отличается от изложенного выше принципа работы поляризационного расщепителя интерференционного типа: для ТЕ-волны время распространения по обоим каналам должно быть одинаково, а для ТМ-волн оно должно быть таким, чтобы сдвиг фаз между волнами, приходящими во входные порты направленного ответвителя, был равен π , т. е. волны в указанных точках должны быть в противофазе.

Мощность оптического излучения на выходах интерферометра Маха—Цендера определяется следующими соотношениями [5]:

$$P_1^{\text{out}} = \sin^2(\Delta\varphi/2) P_1^{\text{in}};$$

$$P_2^{\text{out}} = \cos^2(\Delta\varphi/2) P_1^{\text{in}},$$

где $\Delta\varphi$ — сдвиг фаз между волнами на входе направленного ответвителя; P_1^{in} — мощность оптического сигнала на входе интерферометра.

Зависимость нормированной мощности в выходных портах интерферометра от сдвига фаз между волнами на его входе приведена на рис. 2. Из данных формул видно, что сигналы на обоих выходах интерферометра зависят по-разному от сдвига фаз, вносимых в обоих плечах. В частности, если $\Delta\varphi = \pi$, то вся мощность входного сигнала будет выведена в выходной порт № 1; если $\Delta\varphi = 0$, то, наоборот, сигнал будет выведен через порт № 2.

Если константы распространения различных мод разные (β и $\beta + \Delta\beta$), а геометрическая длина

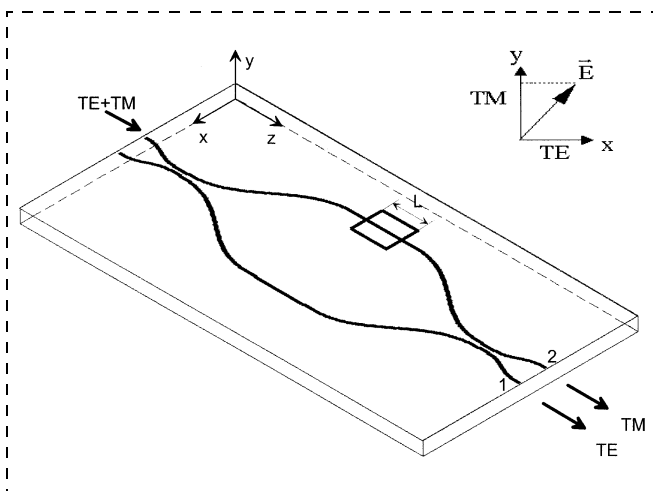


Рис. 1. Пространственный расщепитель ТЕ—ТМ-мод на основе асимметричного интерферометра Маха—Цендера

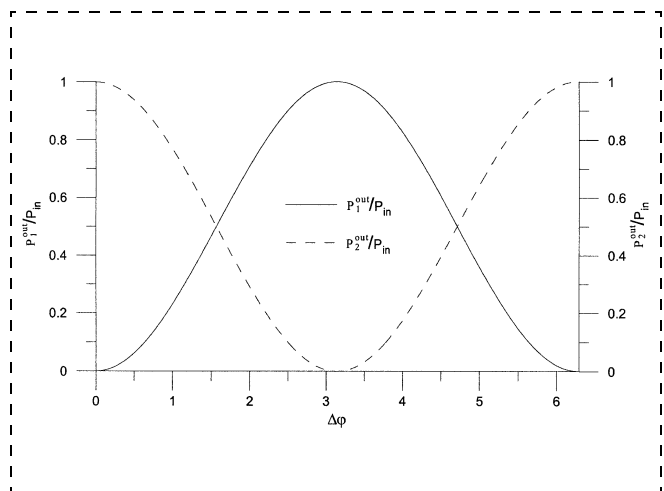


Рис. 2. Зависимость нормированной мощности в выходных портах направленного ответвителя от сдвига фаз между волнами на его входе

плеч L одинакова, то можно определить разность фаз между плечами на выходе:

$$\Delta\varphi = L(\beta + \Delta\beta) - \beta L = L\Delta\beta.$$

Запишем данную формулу отдельно для ТЕ- и ТМ-мод, имеющих различные константы распространения, и следовательно, эффективные показатели преломления:

$$\Delta\varphi_{TE} = k_0(N_{TE}^{(1)} - N_{TE}^{(2)})L = k_0\Delta N_{TE}L;$$

$$\Delta\varphi_{TM} = k_0(N_{TM}^{(1)} - N_{TM}^{(2)})L = k_0\Delta N_{TM}L;$$

где $\Delta\varphi_{TE}$, $\Delta\varphi_{TM}$ — сдвиги фаз между волнами ТЕ- и ТМ-поляризации на выходе плеч интерферометра соответственно; $N_{TE}^{(1)}$ и $N_{TM}^{(1)}$ — эффективные показатели преломления волноводных мод плеча, покрытого металлической пленкой; $N_{TE}^{(2)}$ и $N_{TM}^{(2)}$ — эффективные показатели преломления мод противоположного плеча; $\Delta N_{TE} = N_{TE}^{(1)} - N_{TE}^{(2)}$, $\Delta N_{TM} = N_{TM}^{(1)} - N_{TM}^{(2)}$.

Согласно вышеизложенному принципу разделения поляризаций должен быть внесен поляризационно-зависимый сдвиг фаз: $\Delta\varphi_{TE} = 0$; $\Delta\varphi_{TM} = \pi$. При этом условии ТЕ-волна и ТМ-волна будут разделены по разным выходным портам согласно рис. 1.

Далее рассмотрим каналный металлодиэлектрический волновод с буферным слоем и его планарную модель (рис. 3). Задачей исследования будет подбор таких параметров волновода (в первую очередь, толщины буферного слоя и металлической пленки), при которых наблюдалось бы существенное различие констант ТЕ- и ТМ-мод. С одной стороны, должно удовлетворяться соотношение $\Delta N_{TM} = \pi$ при приемлемой геометрической длине плеча, покрытого пленкой, которое, в свою очередь, определяется максимально возможными размерами всей интегрально-оптической схемы. С другой стороны, влияние металлической пленки на действительную составляющую константы распространения ТЕ₀-моды должно быть пренебрежимо мало: $\Delta N_{TE} \rightarrow 0$. При этом потери световой волны должны быть малыми для обеих поляризаций — менее 1 дБ.

Был проведен электродинамический анализ металлодиэлектрического волновода. При расчете использовался метод конечных элементов для решения волнового уравнения, определяющего характеристики ТЕ- и ТМ-поляризованных волн [8]. Волновые уравнения имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(p \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + (k_0^2 q - \beta^2) \Phi = 0,$$

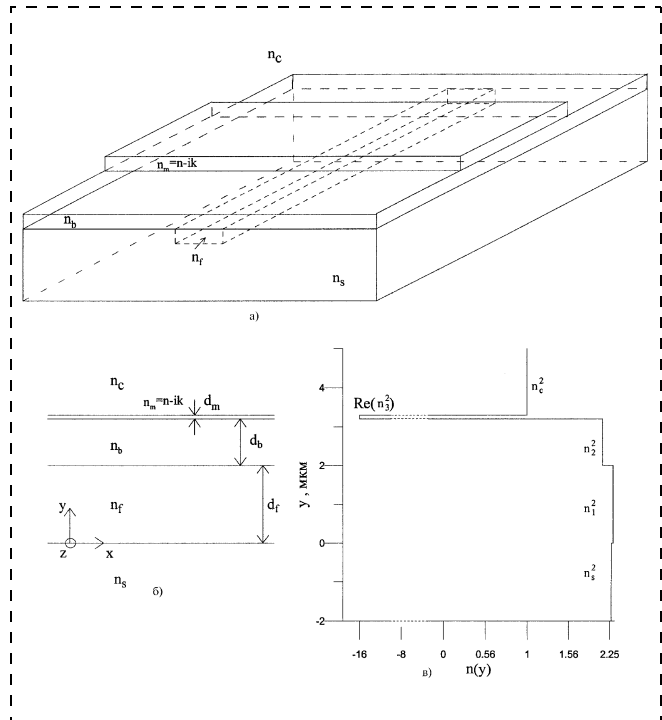


Рис. 3. Металлодиэлектрический каналный волновод с буферным слоем:

а — схематический вид; б — схематический вид эквивалентного планарного металлодиэлектрического волновода с буферным слоем; в — профиль показателя преломления металлодиэлектрического волновода

где неизвестная функция Φ и константы p и q определяются следующим образом:

$$E_x = \Phi \exp(-i\beta z), \quad p = 1, \quad q = n^2 \text{ для ТЕ-волн;}$$

$$H_x = \Phi \exp(-i\beta z), \quad p = 1/n^2, \quad q = 1 \text{ для ТМ-волн,}$$

E_x и H_x — поперечные проекции электрического и магнитного поля соответственно; $n = n(y)$ — распределение показателя преломления. С математической стороны исходная задача решения волнового уравнения путем применения процедуры Галеркина сводилась к обобщенной матричной задаче на собственные значения. Собственные значения в диапазоне

$$k_0^2 n_s^2 < \beta^2 < k_0^2 n_f^2$$

являются квадратом константы распространения волноводных мод, а соответствующие им собственные векторы являются распределением электрических и магнитных полей для ТЕ- и ТМ-волн соответственно. Коэффициент затухания определялся по мнимой части константы распространения.

В качестве основы интегральной схемы использовался полученный по технологии ионного обмена на одномодовый планарный волновод в подложке

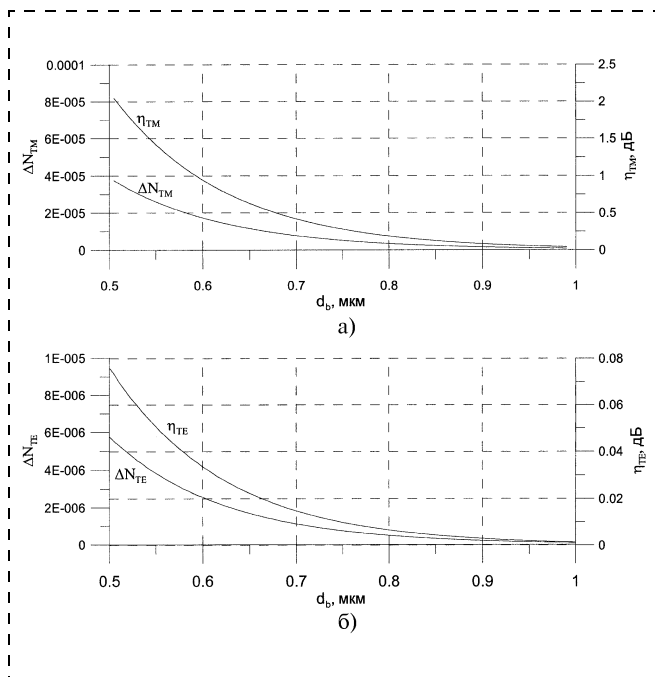


Рис. 4. Совмещенная зависимость разности эффективных показателей преломления плеч волноводного интерферометра и потерь мощности от толщины буферного слоя металлодиэлектрического волновода для ТМ-мод (а) и ТЕ-мод (б)

из стекла со стандартными параметрами. Параметры волновода: показатель преломления стеклянной подложки $n_s = 1,51$, волноведущего слоя $n_f = 1,52$. Толщина волновода $d_f = 1,7$ μm . Рабочая длина волны $\lambda = 0,63$ μm . В качестве буферного слоя была выбрана пленка оксида кремния SiO_2 с показателем преломления $n_b = 1,457$. В качестве металлической пленки использовалось серебро, подходящее по значению диэлектрической проницаемости для проявления эффекта плазмонного резонанса при толщине порядка нескольких десятков нанометров. Показатель преломления серебра $n_m = 0,066241 - 4,0005i$ на указанной длине волны. В качестве покровной среды был выбран воздух, его показатель преломления $n_c = 1$. В пределах расчета с заданным буферным слоем варьировалась его толщина (d_b) в диапазоне 0...2 μm , а также, как параметр, толщина металлической пленки в диапазоне 10...50 нм.

В результате оптимизационных процедур были получены положительные результаты (рис. 4). На рис. 4, а представлена зависимость разности эффективного показателя преломления фундаментальной TM_0 -моды волновода с указанными выше параметрами и волновода с идентичными параметрами, но не имеющего металлической пленки, — ΔN_{TM} . Данный параметр является основной расчетной величиной, характеризующей разность фа-

зовых скоростей в обоих плечах интерферометра. Также на рис. 4, а приведена зависимость потерь энергии в волноводе от толщины буферного слоя. На рис. 4, б представлены аналогичные зависимости для ТЕ-мод.

Как видно из рис. 4, если за отправную точку принять значение потерь волновода для ТМ-мод на уровне 1 дБ, то значение ΔN_{TM} (разность эффективных показателей преломления плеч интерферометра) достигает $2 \cdot 10^{-5}$ при толщине буферного слоя 0,6 μm при толщине металлической пленки 20 нм. Для организации необходимого сдвига фаз двух ТМ-волн длина металлической пленки должна быть равна 1,5 см. Значение ΔN_{TE} в 10 раз меньше значения ΔN_{TM} . Эффективность развязки между каналами, определяемая по отношению мощностей волноводных мод на выходе каналов 1 и 2, составляет 17 дБ для ТЕ-поляризованных волн при $\Delta N_{TE} = 2 \cdot 10^{-6}$. Эффективность развязки между каналами для ТМ-поляризованных мод в обоих случаях соответствует идеальному случаю — 100 %-ной перекачке энергии в один выходной канал.

Таким образом, влияние металлических слоев на фазовую скорость волноводных ТМ-мод оптических волноводов можно использовать в практических целях. На основе интерферометра Маха—Цендера с использованием металлодиэлектрических канальных волноводов в стекле может быть создано эффективное устройство для пространственного разделения различных поляризационных компонент оптического излучения.

Список литературы

1. Lee S.-S., Garmer S., Steier W., Shin S.-Y. Integrated optical polarization splitter based on photobleaching-induced birefringence in azo dye polymers // *Applied Optics*. 1999. V. 38. N 3. P. 530—533.
2. Векшин М. М., Хотнянская Е. Б., Никитин В. А., Яковенко Н. А. Интегрально-оптический поляризационный рефлектометр // *Микросистемная техника*. 2003. № 7. С. 3—5.
3. Miliou A. N., Srivasta R., Ramaswamy R. V. A 1.3 μm directional coupler polarization splitter by ion exchange // *J. Lightwave Technol.* 1993. V. 11. N 2. P. 220—225.
4. Maruyama H., Haruna M., Nishinara H. TE-TM mode splitter using directional coupling between heterogeneous waveguides in LiNbO_3 // *Journal of Lightwave Technology*. 1995. V. 13. N 7. P. 1550—1554.
5. Shani Y., Henry C. H. Four-port integrated optic polarization splitter // *Appl. Optics*. 1990. V. 29. N 3. P. 337—339.
6. Jonhstone W., Stewart G., Hart T., Culshaw B. Surface plasmon polaritons in thin metal films and their role in fiber optic polarizing devices // *Journal of Lightwave Technology*. 1990. 8. N 4. P. 538—543.
7. Ctyroky J., Yee S. S., Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: review // *Sensors and Actuators. B*. 1999. V. 54. N 13. P. 3—11.
8. Hayata K., Nagai M. Finite element formalism for nonlinear slab-guided waves // *IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques*. 1988. V. 36. N 7. P. 1207—1215.

УДК 621.3

И. Б. Кобяков, ООО "РЭМ-вибро",
С. А. Гамкрелидзе, д-р техн. наук, проф.,
СПП при Президиуме РАН,
А. А. Сперанский, ООО "РЭМ-вибро"

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ ВЕКТОРНЫЕ ВИБРОДАТЧИКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ АГРЕГАТОВ

Создан, испытан и сертифицирован принципиально новый тип средств измерений — трехкомпонентный с одним чувствительным элементом (векторный) пьезоэлектрический виброакселерометр. Отечественная разработка впервые открывает возможности получения полной (достоверной) информации и вибрации.

Введение

Эффективность использования бортового оборудования мобильных объектов (кораблей, самолетов, космических аппаратов и др.) во многом зависит от решения комплекса проблем повышения его надежности, продления ресурса, прогнозирования и оперативного устранения отказов. В последние годы в связи со значительным износом оборудования в системах и комплексах с длительными сроками активного функционирования существенно возрастает роль контроля динамических параметров силовых агрегатов и конструкций с целью предсказания допустимых сроков их эксплуатации, а в ряде случаев и для предупреждения катастроф. Наиболее информативными способами решения указанной задачи являются вибромониторинг и вибродиагностика.

Принципиальные проблемы развития виброизмерительной техники и пути их решения

В области виброизмерительной техники в нашей стране, впрочем, как и во всем мире, имеются существенные проблемы. Более 90 %

используемых в мировой практике датчиков вибрации (далее — вибродатчиков) представляют собой однокомпонентные виброакселерометры, способные измерять лишь проекцию вектора виброускорения на ось датчика (рис. 1).

Но одна эта проекция не позволяет определить ни величину, ни направление вектора виброускорения a . Для решения этой проблемы требуется не однокомпонентный, а трехкомпонентный датчик. И тогда по трем проекциям вектора a можно получить его длину и направление в заданной системе координат. Однако все известные трехкомпонентные виброакселерометры представляют собой сочетание трех однокомпо-

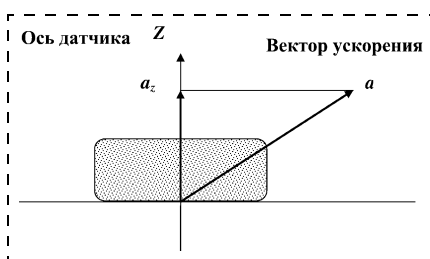


Рис. 1. Графическая интерпретация функционирования однокомпонентного вибродатчика

нентных датчиков в одном корпусе. При таком инженерном решении проблемы чувствительные элементы датчиков неизбежно располагаются в трех различных точках пространства, т. е. если имеются три измерительные точки, то их сигналы из-за фазовых рассогласований нельзя отождествлять с проекциями вектора виброускорения. Тем не менее это обстоятельство, как правило, игнорируется, что, естественно, искажает информацию об уровне вибрации самолетов и вертолетов, силовых агрегатов кораблей в точках контроля безопасного уровня вибрации.

Для достоверного определения длины и направления вектора виброускорения в каждой измерительной точке российским научно-производственным предприятием ООО "РЭМ-вибро" создан трехкомпонентный (векторный) виброакселерометр с одним чувствительным элементом. Датчик нового поколения сертифицирован Госстандартом РФ, прошел апробацию в Институте машиноведения РАН, на ведущих европейских фирмах "Виброметр" (Швейцария), Брюль и Кьер (Дания).

Принципиальное отличие предлагаемого датчика (Патенты РФ № 2061242 и № 2229136. Трехкомпонентный пьезоэлектрический виброакселерометр с одним чувствительным элементом) заключается в том, что в нем используется лишь один чувствительный элемент (т. е. имеется лишь одна измерительная точка) в виде прямоугольного параллелепипеда, изготовленного из пьезокристалла определенной симметрии и ориентации.

Принцип работы векторного датчика показан на рис. 2.

Если вектор виброускорения a направлен вдоль оси Z , то заряды возникают лишь на гранях, пер-

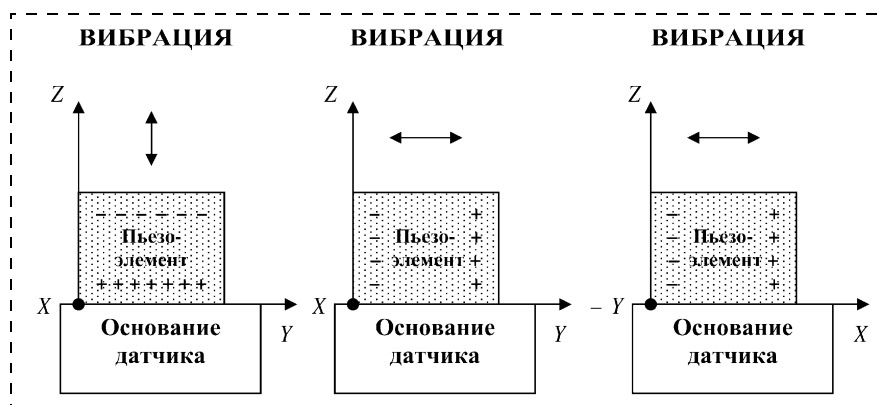


Рис. 2. Графическая интерпретация функционирования трехкомпонентного вибродатчика

пендикулярных оси Z ; если вектор a направлен вдоль оси Y , то заряды возникают на гранях, перпендикулярных оси Y . И наконец, если вектор a направлен вдоль оси X , то заряды возникают лишь на гранях, перпендикулярных оси X . В каждом из этих трех случаев на остальных четырех гранях зарядов вообще не будет, что следует из теории симметрии и тензорного анализа. Таким образом, тео-

ретически поперечная чувствительность датчика должна быть равна нулю, что можно представить в виде матрицы (рис. 3).

Технические характеристики векторных датчиков зависят от качества пьезоэлемента, кабеля, клея, разъемов и конструкции. Но даже при использовании отечественных комплектующих, как следует из таблицы, получены характеристики, превосходящие по

ВИБРАЦИЯ				
ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ		X	Y	Z
	X	100	0	0
	Y	0	100	0
	Z	0	0	100
%				

Рис. 3. Распределение выходного сигнала по осям вибродатчика

Сравнительные характеристики трехкомпонентных вибродатчиков

Технические характеристики	Векторный вибродатчик, тип ВТК-3	"Брюль и Кьер", тип 4506	"Эндевко", тип 2228С
Число измеряемых осей	3	3	3
Число пьезоэлементов	1	1	3
Основная чувствительность (датчик + усилитель), мВ/г	150	100	—
Максимальная поперечная чувствительность, %	5	5	5
Частота резонанса вдоль оси Z , кГц	58	10	21
Частотный диапазон (5 %), Гц	5...15000	—	—
Частотный диапазон (± 5 %), Гц	—	—	20...4000
Частотный диапазон (± 10 %), Гц	—	1...2000	—
Температурный диапазон, °С	-30...+250	-54...+121	-55...+175
Температурный коэффициент чувствительности	0,1 %/°С	1 м·с ⁻² /°С	0,2 %/°С
Размеры, мм	∅ 17 × 20	17 × 17 × 14,5	—
Масса без кабеля, г	13	15	15

параметрам аналогичные зарубежные датчики фирмы "Брюль и Кьер" (тип 4506) и фирмы "Эндевко" (тип 2228С).

Но главное отличие предлагаемого датчика от известных аналогов заключается не в том, что одни параметры лучше, а другие хуже, а в том, что только он имеет единую измерительную точку. Это позволяет по трем проекциям получить значение и направление вектора виброускорения в этой точке. Следовательно, только датчик нового поколения позволяет получить **достоверную** информацию о режимах вибрации различных машин и механизмов. При использовании любых других датчиков связь между параметрами механических вибраций и электрическими сигналами виброизмерительной системы имеет существенную погрешность.

Датчик работает в комплекте с трехканальным усилителем заряда, имеющим симметричный (дифференциальный) высокоомный вход и несимметричный низкоомный выход. К усилителю прилагается блок питания постоянного тока ± 5 В.

Результаты натурных испытаний

Проведены сравнительные испытания штатного однокомпонентного датчика (тип АВС-117, изготовитель — завод "Биофизприбор", г. Львов) и векторного вибропреобразователя нового поколения (тип ВТК-3, разработчик — НПП "РЭМ-вибро", г. Ногинск Московской обл.) с участием ФГУП "Мотор" на испытательном стенде ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского. Результаты испытаний в реальных условиях на одном из режимов авиационного двигателя (тип АИ-9В) приведены на рис. 4. Измерения штатного датчика, установленного на двигателе параллельно оси Z , полностью совпали с измерениями вдоль соответствующей оси трехкомпонентного вектор-

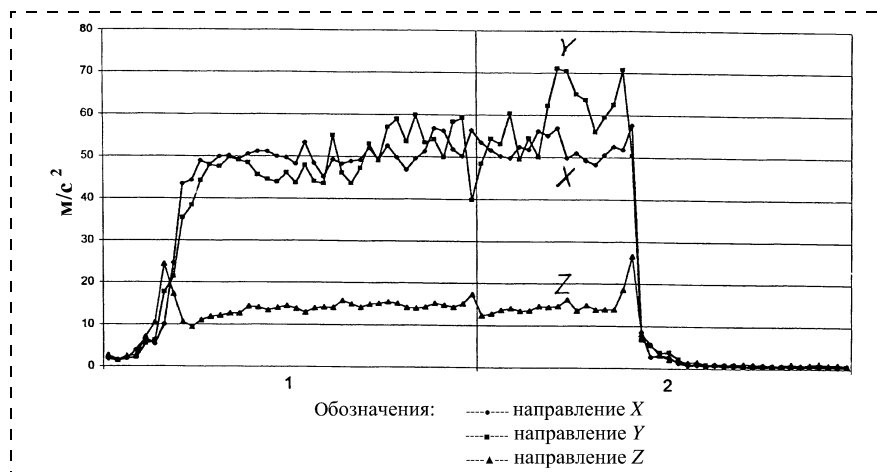


Рис. 4. Результаты натурных испытаний авиационного двигателя с использованием трехкомпонентного вибродатчика

ного датчика и составили 1,5 g. При этом вдоль оси X векторного датчика ускорение составило 5 g, а вдоль оси Y — 5,5 g. Таким образом, измеренное с помощью векторного датчика подлинное виброускорение составило 7,6 g при одновременном показании штатного датчика 1,5 g, т. е. показания штатного датчика занижены в 5 раз. Аналогичные испытания

проведены ЦИАМ им. П. И. Баранова на двигателе АЛ-31 Ф НТЦ им. А. Люльки и в НПО "Сатурн".

Выводы

Создание современной виброизмерительной техники на базе трехкомпонентных вибродатчиков нового поколения (векторных вибропреобразователей) позволит

значительно сократить объем и стоимость регламентных и ремонтных работ при эксплуатации мобильных объектов. Например, в авиации они могут эффективно использоваться для контроля вибросостояния двигателей (при стендовых и бортовых испытаниях), вибрационного контроля конструкции планера, а также мест крепления двигателей к планеру в процессе создания новых типов самолетов с целью снижения уровня шума. На кораблях, в том числе с ядерными энергетическими установками, трехкомпонентные вибродатчики найдут применение при проведении вибромониторинга и вибродиагностики турбин, выполнении виброисследований новых конструкций силовых агрегатов, для балансировки роторов, нормализации повышенного уровня вибрации всех элементов конструкций основного и вспомогательного оборудования (турбин, насосов, паропроводов и др.).

ИНФОРМАЦИЯ

Microwave Office теперь умеет моделировать MEMS-устройства

Компания Applied Wave Research (www.mwoffice.com) заявила об интеграции своего пакета проектирования СВЧ устройств Microwave Office с программным обеспечением для разработки микроэлектромеханических (MEMS) устройств EM3DS итальянской компании MEM Research (www.memresearch.com).

Интеграция стала возможной благодаря использованию универсального интерфейса EM Socket, обеспечивающего передачу топологической информации между двумя системами.

Теперь пользователи пакета Microwave Office могут готовить схемы и топологии разрабатываемых ими устройств в рамках привычной им среды проектирования AWR Design Environment и передавать в систему EM3DS для дальнейшего моделирования без выполнения операции импорта и экспорта файлов. Пользователи, хорошо знакомые с пакетом EM3DS, могут работать в его собственном топологиче-

ском редакторе. При этом топологические данные и результаты расчета оказываются напрямую встроенными в объектно-ориентированную базу данных Microwave Office.

Пакет EM3DS представляет собой программу трехмерного электромагнитного моделирования квазипланарных структур, специально предназначенную для проектирования микроэлектромеханических устройств (MEMS) и монолитных СВЧ интегральных схем (ММИС). Он позволяет моделировать толстые проводники, неоднородности в диэлектрике и эффекты в пьезоэлектрических материалах. Например, здесь есть возможность анализа резонаторов на объемных акустических волнах с учетом высокочастотных паразитных связей и акустические эффекты в средах с частотно-зависимыми свойствами.

Возможность описывать распределенные и управляемые источники токов впервые позволяет выполнить полное моделирование MESFET- и HEMT-транзисторов.

За любой дополнительной информацией просим обращаться по адресу info@eltm.ru или телефону (095) 974-14-80

УДК 621.38.049,77

Э. И. Соборовер, канд. хим. наук, И. Л. Зубков,
Научно-исследовательский институт химии
Государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
"Нижегородский государственный университет
им. Н. И. Лобачевского"

ПЛОСКОВОЛНОВОДНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ СЕНСОР ДЛЯ МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ АТМОСФЕРНОГО МОНИТОРИНГА

Показана возможность использования плосковолнового оптического химического сенсора с полимерным волноводом из полиметилметакрилата (ПММА) толщиной 0,92 мкм и чувствительным слоем — пленкой функционализированного катионами бриллиантового зеленого полидиметилсилоксана (ПДМС) в качестве мультисенсора четырех газов — основных приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха: оксида углерода (CO), аммиака (NH₃), диоксида серы (SO₂) и сероводорода (H₂S).

Введение

Оптические химические сенсоры (ОХС), использующие для получения аналитического сигнала эффект многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО) на границе волновод/чувствительный слой, вследствие их высокой чувствительности и возможностей в биосенсорике получили широкое распространение [1, 2]. Конструктивно сенсоры данного типа могут быть реализованы как на основе оптического волокна (ВОХС), так и в плосковолноводном варианте (ПОХС) [3]. Тем не менее, с точки зрения возможности интегрально-оптического исполнения в виде единой мультисенсорной платформы плосковолноводный вариант предпочтительней [3, 4]. Повышенная чувствительность современных конструкций ПХС связана с использованием эффекта многократного полного внутреннего отражения (МПВО) на границе волновод/чувствительный слой, причем количество ПВО на 1 см длины волновода находится в интервале 10^3 — 10^4 , а толщина волноводного слоя немного больше длины волны зондирующего света [5].

В качестве волноводного слоя в большинстве случаев применяют микропористые стекла, изготовленные по золь-гель технологии на основе оксидов кремния и титана; данная технология позволяет, изменяя исходный состав тетраалкилоксисиланов (силанов),

изготавливать микропористые стекла с различными показателями преломления и прозрачностью в необходимом спектральном интервале зондирующей длины волны [6].

В качестве чувствительных слоев ПОХС используются те же золь-гель микропористые слои, только с введенными в них реагентами, например, бромкрезоловый пурпурный — на аммиак [7, 3], эритрозин Б — на водяные пары [6], фенильные группы — на газообразный йод [5].

Изготовленные таким образом сенсоры обладают прекрасными газодиффузионными и аналитическими характеристиками. Но для ПОХС, изготовленных по золь-гель технологии, практически отсутствуют данные о временной стабильности сенсорных характеристик. За редким исключением проблематично связать молекулы аналитических реагентов с молекулами гель-матриц химическими связями; как правило, они удерживаются в матрице с помощью сил Ван-дер-Ваальса и водородных связей. Кроме этого, проблематично включать биологически активные молекулы в состав геля, т. е. сенсоры, созданные на основе пористых стекол, трудноприменимы в биоанализе.

С точки зрения временной стабильности сенсорных характеристик предпочтительней использовать в качестве чувствительных слоев материалы с химически связанными молекулами аналитических реагентов, в частности, функциональные полимеры с ковалентно- или ионно-связанными фрагментами молекул аналитических реагентов [8, 9]. Поэтому в данной работе в качестве чувствительного слоя использовался функционализированный катионами трифенилметанового красителя — бриллиантового зеленого (БЗ) полидиметилсилоксан (ПДМС), который является прекрасным модельным соединением в реакции с аммиаком для разработки конструкций ПОХС [10]. На ПОХС с этим чувствительным слоем был получен сенсорный эффект на аммиак и диоксид серы, связанный со специфическим взаимодействием молекул газов с катионами БЗ с образованием бесцветной псевдолейкоформы катиона красителя [11, 12]. Кроме этого, было установлено, что в эту реакцию вступают и два других газа — сероводород и диоксид азота, входящие в список основных приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха [13].

Конструкция плосковолноводного оптического химического сенсора с тонким ПММА волноводом

Ранее была разработана трехслойная конструкция ПОХС: основа — кварцевая пластина, служащая для ввода света в тонкослойный полимерный волновод из полиметилметакрилата (ПММА), нанесенный на эту основу, и чувствительный слой — ПДМС, функционализированный катионами БЗ, нанесенный на волновод (рис. 1) [14]. Ввод света в волновод осуществляется через торец подложки — пластины плавленого кварца. Из соотношения, выведенного из законов лу-

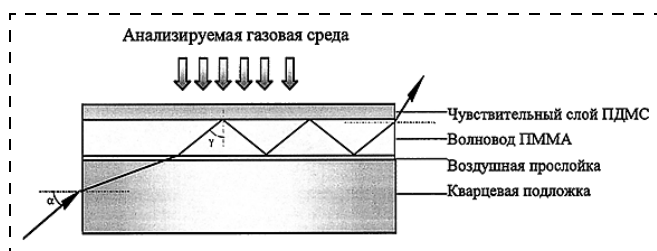


Рис. 1. Трехслойная конструкция плосковолноводного оптического химического сенсора

чевой оптики, показывающего количество **ПВО** на границе волновод/чувствительный слой на всей длине волновода, видно, что для повышения чувствительности данной конструкции **ПОХС** необходимо было уменьшать толщину волновода, увеличив тем самым количество **ПВО** на единицу длины волновода [10]. В измерительной системе, смонтированной на рельсе оптической скамьи, в качестве источника света использован твердотельный лазер с максимумом излучения 645 нм; в качестве фотоприемника применен ФЭУ-106, падение напряжения на котором считывалось вольтметром В7-38 (напряжение питания ФЭУ: 1860 В от стабилизированного выпрямителя ВС-22) (рис. 2, а).

В состав измерительной системы входит поворотное устройство, в котором закреплен источник света, позволяющее изменять угол ввода света в образец. Для разделения световых потоков, выходящих из волновода и кварцевой подложки, образец был развернут относительно оптической оси системы, включающей источник света и образец, таким образом, что угол

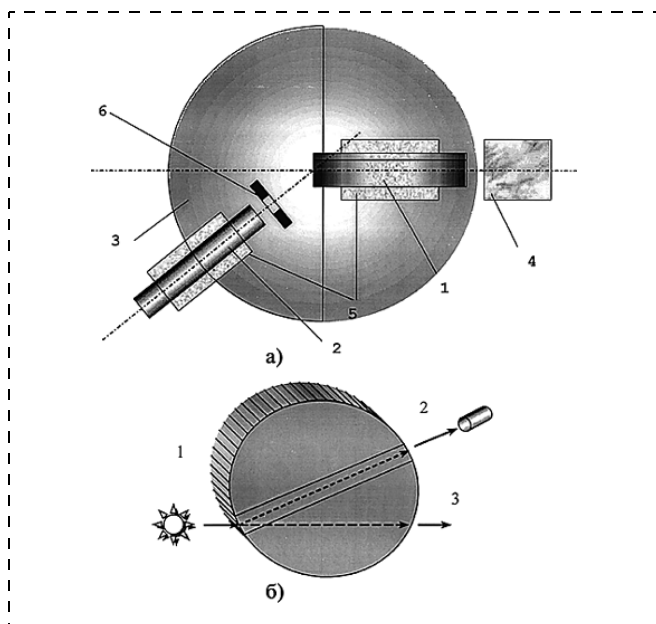


Рис. 2. Измерительная система (а): 1 — образец; 2 — лазер; 3 — поворотное устройство; 4 — фотоприемник; 5 — держатели; 6 — диафрагма, и схема установки образца сенсора для дискриминации светового потока, выходящего из волновода, от светового потока, выходящего из кварцевой подложки (б): 1 — луч, входящий в образец; 2 — луч, выходящий из волновода; 3 — луч, выходящий из подложки

между волноводом и оптической осью составлял 10° , что дало возможность дискриминировать световой поток, выходящий из волновода, от светового потока, выходящего из кварцевой подложки (рис. 2, б). Для данного сенсора был получен многократный обратимый отклик на аммиак с пределом обнаружения по аммиаку 29 млрд^{-1} ($0,02 \text{ мг/м}^3 = 0,5 \text{ ПДК}$ среднесуточной) [14].

Целью данной работы стало рассмотрение возможности использования **ПОХС**-сенсора данной конструкции в качестве базового элемента оптического мультисенсора для мониторинга основных приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха: оксида углерода (**CO**), аммиака (**NH₃**), диоксида серы (**SO₂**) и сероводорода (**H₂S**). Для этого необходимо было исследовать сенсорный отклик в воздушном потоке, содержащем газы-загрязнители атмосферного воздуха: **CO**, **NH₃**, **SO₂**, **H₂S**, для чего необходимо было предварительно разработать методику исследования.

Экспериментальная часть

Методика исследования сенсорного отклика в воздушном потоке, содержащем газы СДЯВ: CO, NH₃, SO₂, H₂S. Для получения отклика сенсора на присутствие газов — сильнодействующих ядовитых веществ (**СДЯВ**) в воздухе (точнее говоря, в воздушном потоке) была применена следующая методика проведения измерений. Газовые смеси **СДЯВ** с искусственным воздухом приготавливались в баллонах в статическом режиме. Концентрации ниже исходных получались динамическим смешением двух потоков: основного потока лабораторного воздуха и потока искусственного воздуха, содержащего исходную концентрацию газов — **СДЯВ**. Для учета влияния на отклик сенсора основного воздушного потока, обусловленного физической адсорбцией молекул газов **неСДЯВ** чувствительной **ПДМС**-пленкой, и выявления вклада в аналитический сигнал, вносимого сорбцией молекул газов **СДЯВ** (**CO**, **H₂S**, **NH₃**, **SO₂**), измерения проводились в два этапа:

- измерение аналитического сигнала в газовых потоках, названных модельными, которые формировались смешением основного воздушного потока, создаваемого мембранным насосом, с потоком искусственного воздуха, не содержащим газов **СДЯВ**; при этом концентрация искусственного воздуха в основном потоке лабораторного воздуха последовательно ступенчато увеличивалась; всего использовалось пять концентраций; каждая концентрация подавалась из баллона через редуктор в течение 10 мин;
- измерение аналитического сигнала в газовых потоках, которые формировались смешением основного воздушного потока, с потоком искусственного воздуха, содержащего один из газов **СДЯВ** и подаваемого в основной поток; при этом также последовательно увеличивалась его концентрация.

Результаты сенсорных измерений и их обсуждение.

Для построения градуировочных графиков сенсора без вычитания модельной смеси, когда фотоотклик сенсора формируется под влиянием физической и хи-

мической сорбции всех газов, включая газы **СДЯВ**, каждый 10-минутный участок кинетической кривой (не менее 30 точек), соответствующий определенной концентрации газа **СДЯВ**, аппроксимировался функцией

$$Y = X/(A + BX),$$

где Y — фотоотклик в вольтах; X — время в секундах; A , B — параметры функций.

Для построения градуировочных графиков брались не экспериментальные значения фотоотклика, а расчетные, полученные для конца каждого 10-минутного интервала; всего для построения графиков использовалось пять концентраций. При этом брались не абсолютные значения величин фотоотклика U , а изменение фотоотклика относительно начального значения

$$\Delta U = U_i - U_0,$$

где U_i — расчетное значение фотоотклика сенсора, взятое для конца каждого 10-минутного интервала.

На рис. 3 треугольниками обозначены кривые зависимости отклика сенсора от концентрации газов **СДЯВ** в воздушном потоке, полученные без вычитания модельной смеси. Как видно на рис. 3, а, в случае **СО**, вплоть до его концентрации 3000 мг/м^3 , наблюдается очень слабая по сравнению с другими газами **СДЯВ** зависимость изменения фотоотклика. В случае **НН₃** и **SO₂** (рис. 3, б, в) для первых двух самых малых его концентраций в воздушном потоке наблюдается снижение фотоотклика сенсора, а для последующих трех больших концентраций наблюдается "правильное" увеличение фотоотклика, которое связано с обесцвечиванием чувствительного **ПДМС**-слоя [15]. В случае **Н₂S** (рис. 3, г) на кинетической кривой наблюдается

Уравнения, представляющие градуировочные графики **ПОХС**-сенсора

Газ	Без вычитания модельной смеси	С вычитанием модельной смеси
CO	$U = -(0,0013 \pm 0,0004) - (3,30 \pm 2,00)10^{-7} \cdot C;$ $R = -0,64$	$U = -(0,0013 \pm 0,0004) + (2,90 \pm 2,00)10^{-7} \cdot C;$ $R = 0,64$
H ₂ S	$U = (0,0072 \pm 0,0015) + (1,018 \pm 0,282)10^{-3} \cdot C;$ $R = 0,98$	$U = (0,0073 \pm 0,0015) + (1,168 \pm 0,279)10^{-3} \cdot C;$ $R = 0,98$
NH ₃	$U = -(0,0058 \pm 0,0004) + (4,519 \pm 0,063)10^{-3} \cdot C;$ $R = 0,9999$	$U = -(0,0058 \pm 0,0007) + (6,804 \pm 0,0093)10^{-3} \cdot C;$ $R = 0,9999$
SO ₂	$U = -(0,0063 \pm 0,0007) + (1,575 \pm 0,564)10^{-6} \cdot C;$ $R = 0,96$	$U = -(0,0062 \pm 0,0007) + (2,947 \pm 0,587)10^{-6} \cdot C;$ $R = 0,98$

рост фотоотклика сенсора, связанный, как и в случае с **SO₂** и **НН₃**, с обесцвечиванием чувствительного **ПДМС**-слоя.

Для построения градуировочного графика сенсора с учетом влияния молекул воздуха (азота, кислорода и др.) на аналитический сигнал из кинетической кривой, полученной в воздушном потоке, содержащем газы **СДЯВ**, вычиталась аналогичная кривая, полученная в атмосфере модельной смеси. Процедура заключалась в вычитании из каждого участка кривой напуска **СДЯВ** аналогичного участка кинетической кривой модельной смеси, экстраполированной на тот же момент времени напуска. В случаях трех газов **СДЯВ**, за исключением **СО**, наблюдаются зависимости изменения фотоотклика, аналогичные зависимостям, полученным без процедуры вычитания модельной смеси (см. рис. 3). В случаях **НН₄** и **SO₂** зависимости изменения фотоотклика (для трех последних концентраций) от концентрации газов **СДЯВ** в воздушном потоке хорошо описываются линейными зависимостями, приведенными в таблице [16]. В случае **Н₂S** зависимость изменения фотоотклика от концентрации хорошо аппроксимируется уравнением, являющимся математическим выражением изотермы Лэнгмюра. Сложный ход зависимостей изменения фотоотклика сенсора от концентраций газов **СДЯВ** объясняется эффектом тренировки сенсора, заключающемся в постепенном вытеснении молекул газов **неСДЯВ** молекулами газов **СДЯВ** из центров физической сорбции, так как стадия физической сорбции, по всей видимости, предшествует стадии хемосорбции молекул газов **СДЯВ**. В общем случае изменение фотоотклика сенсора, вызванное сорбцией газов, можно представить следующим образом:

$$\Delta U_{\text{СДЯВ}} = U_{\text{СДЯВ}} - U_0,$$

где U_0 — значение фотоотклика сенсора в начальный момент времени на воздухе; $U_{\text{СДЯВ}}$ — стационарное значение фотоотклика сенсора в воздушном потоке, содержащем какой-либо из газов **СДЯВ**, соответствующее установившемуся равновесию процессов сорбции газов пленкой чувствительного слоя **ПДМС**.

Вместе с тем,

$$\Delta U_{\text{СДЯВ}} = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3, \quad (1)$$

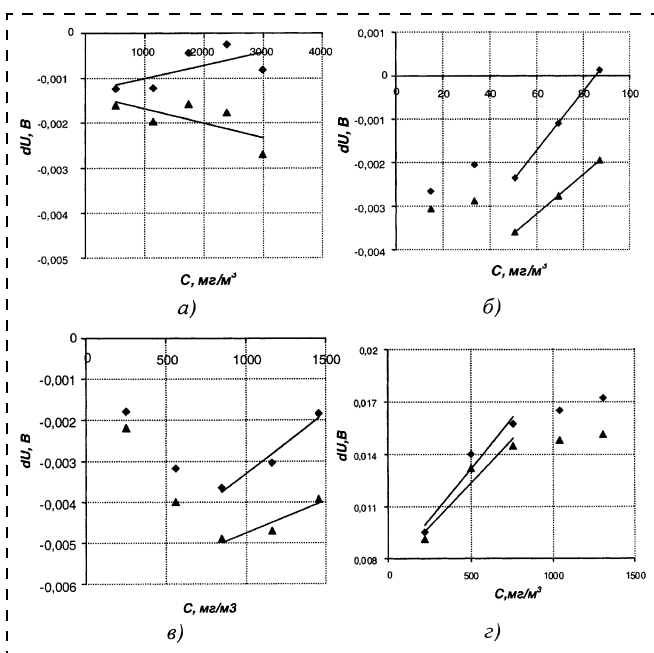


Рис. 3. Градуировочные графики сенсора на газы **СДЯВ** (♦ — с вычитанием модельной смеси, ▲ — без вычитания модельной смеси):

а — **СО**; б — **НН₃**; в — **SO₂**; г — **Н₂S**

где ΔU_1 и ΔU_2 — изменения, вызванные физической сорбцией молекул воздуха (азота, кислорода и др.) и молекул газа СДЯВ соответственно; ΔU_3 — изменение, вызванное хемосорбцией молекул газа СДЯВ.

В случае напуска модельной смеси на поверхность сенсора аналогичное выражение для изменения фотоотклика сенсора выглядит следующим образом:

$$\Delta U_{\text{мс}} = \Delta U_1. \quad (2)$$

При вычитании выражения (2) из выражения (1), которое соответствует процедуре вычитания, описанной выше, получаем

$$\Delta U_{\text{физ} + \text{хем}} = \Delta U_2 + \Delta U_3, \quad (3)$$

которое показывает вклад физической и хемосорбции молекул газов СДЯВ в общее изменение фотоотклика, вызванное сорбцией газов пленкой чувствительного ПДМС-слоя, содержащего ионносвязанные катионы БЗ. Сравнение градуировочных графиков, полученных с процедурой вычитания модельной смеси и без нее, показывает небольшую разницу в наклонах графиков, которая связана с вкладами физадсорбции газов СДЯВ в общее значение их сорбции. Из этого следует, что газы СДЯВ, за исключением оксида углерода, сорбируются ПДМС-чувствительным слоем в основном за счет хемосорбции, вызванной со взаимодействием молекул газов СДЯВ с катионами БЗ. Поэтому в качестве меры сенсорной чувствительности может быть взят коэффициент A из уравнения градуировочного графика

$$\Delta U = AC + B,$$

где ΔU — изменение фотоотклика сенсора, В; C — концентрация газа СДЯВ в воздушном потоке, мг/м³. Значения сенсорной чувствительности данного сенсора в зависимости от природы газа СДЯВ располагаются в ряду: $\text{NH}_3 > \text{H}_2\text{S} > \text{SO}_2 > \text{CO}$ (рис. 4). Если представить значение сенсорного отклика в логарифмическом виде, то сенсорные чувствительности для всех четырех газов СДЯВ становятся соразмерными, т. е. примененный в данном сенсоре чувствительный материал отвечает основному требованию, предъявляемому к сенсорным материалам в любой мультисенсорной системе [17]. Таким образом, данный сен-

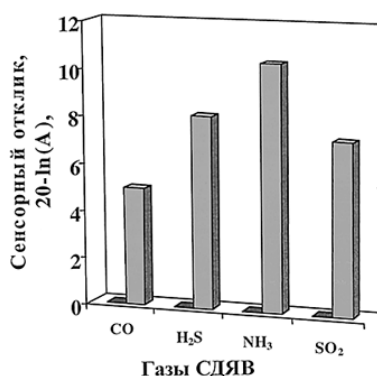


Рис. 4. Диаграмма сенсорной чувствительности

сор с чувствительным слоем ПДМС, функционализированном катионами красителя бриллиантового зеленого, может быть взят в качестве базового элемента для разработки ПВО-мультисенсора для мониторинга основных приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха.

Список литературы

1. Potyrailo R. A., Hobbs S. E., Hieftje G. M. Optical waveguide sensors in analytical chemistry: today's instrumentation, applications and trends for future development // Fresenius J. Anal. Chem. 1998. V. 362. P. 349—373.
2. Gauglitz G. Chemo- und Biosensoren mit optischen transducern // Techn. Mess. 1995. Bd 62. N 5. P. 204—212.
3. Puyol M., Del Valie M., Garces I., Villuendas F., Domingues C., and Alonso J. Integrated waveguide absorbance optode for chemical sensing // Anal. Chem. 1999. V. 71. N 22. P. 5037—44.
4. Ross S. E., Seliskar C. J., Heineman W. R. Spectroelectrochemical sensing based on multimode selectivity simultaneously achievable in a single device // Anal. Chem. 2000. V. 72. P. 5549—5555.
5. Yang L., Saavedra S. S., Armstrong N. R. Sol-gel-based, planar waveguide sensor for gaseous iodine // Anal. Chem. 1996. V. 68. N 11. P. 1834—1841.
6. Skrdla P. J., Saavedra S. S., Armstrong N. R., Sergio B. Mendes and N. Peyghambarian Sol-gel-based, planar waveguide sensor for water vapor // Anal. Chem. 1999. V. 71. N 7. P. 1332—1337.
7. MacCraith B. D., Burke C. S., Poletesky L. Optical ammonia sensor employing a planar waveguide platform // www.physics.dcu.ie.2003.
8. Соборовер Э. И., Зубков И. Л., Тверской В. А. Функциональный полидиметилсилоксан в качестве чувствительного материала плосковолноводного оптического химического сенсора // Тез. докл. Всерос. научн.-техн. дистанционной конф. "Электроника". М.: МИЭТ, 2001. С. 59—60.
9. Hierlemann A., Ricco A., Bodenhofer K., Dominik A., and Gopel W. Conferring selectivity to chemical sensors via polymer side-chain selection: thermodynamics of vapor sorption by a set of polysiloxanes on thickness-shear mode resonators // Anal. Chem. 2000. V. 72. N 16. P. 3696—3708.
10. Соборовер Э. И., Бакулин П. А. Исследование сенсорного эффекта в плосковолноводном оптическом химическом газовом сенсоре // Датчики и системы. 2000. № 3. С. 11—17.
11. Соборовер Э. И., Аксенова И. В., Тверской В. А. Исследование пленок функциональных полимеров для оптического химического сенсора диоксида серы // Вестник НГТУ им. Н. И. Лобачевского. Сер. "Химия". Вып. 1(2). Изд-во НГТУ. 2000. С. 194—202.
12. Соборовер Э. И., Гундорин В. В. Исследование сенсорного эффекта в плосковолноводном оптическом химическом газовом сенсоре трехслойной конструкции // Датчики и системы. 2001. № 6. С. 23—28.
13. Соборовер Э. И., Токарев С. В., Тверской В. А., Царапкин А. В. Исследование пленок функциональных полимеров для мультисенсорной системы атмосферного мониторинга // Тез. докл. IV Междунар. научно-техн. конф. "Электроника и информатика-2002". Ч. 2. М.: МИЭТ, 2002. С. 348.
14. Соборовер Э. И., Зубков И. Л. Высокоэффективная конструкция плосковолноводного оптического химического сенсора // Датчики и системы. 2003. Вып. 4. С. 2—7.
15. Соборовер Э. И., Тверской В. А., Швандеров А. Ф. Синтез функциональных полисилоксанов и исследование их пленок в качестве реагентных фаз химических газовых сенсоров // Программа и тезисы докл. Всерос. Конф. "Кремнийорганические соединения: синтез, свойства, применение". Москва, 1—4 февр. 2000. С. 81.
16. Зубков И. Л., Леонтьев С. Е., Соборовер Э. И., Тверской В. А. Пленки функциональных полимеров в качестве реагентных фаз плосковолноводных оптических химических сенсоров мультисенсорной системы атмосферного мониторинга // Тез. докл. IV Междунар. научно-техн. конф. "Электроника и информатика-2002". Ч. 2. М.: МИЭТ, 2002. С. 324.
17. Соборовер Э. И. Органические материалы в чувствительных слоях химических сенсоров мультисенсорных систем анализа газов и паров // Тез. докл. IV Междунар. научно-техн. конф. "Электроника и информатика-2002". Ч. 2. М.: МИЭТ, 2002. С. 346—347.

УДК 621.371

Е. А. Пуганова¹, А. В. Комаров²,
М. Ю. Вагин¹, Е. Е. Карякина¹,
А. А. Карякин¹,

¹Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

²НИИ скорой помощи
им. Н. В. Склифосовского, г. Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОДОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ БЕРЛИНСКОЙ ЛАЗУРЬЮ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА В ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЯХ

Исследованы аналитические характеристики микроэлектродов, модифицированных берлинской лазурью в отношении определения пероксида водорода по сравнению с дисковыми электродами. Чувствительность определения пероксида водорода составила 2,5 А/(М·см²), что в 5 раз выше, чем для дисковых электродов. Показана применимость полученных микроэлектродов, модифицированных берлинской лазурью, для определения пероксида водорода в физиологических жидкостях.

Введение

Определение пероксида водорода является важной аналитической задачей, так как оно необходимо при экологическом мониторинге, в клинической диагностике и в различных отраслях промышленности [1,2].

В клинической диагностике в последнее время большое внимание уделяется проблеме окислительного стресса, при котором происходит изменение концентрации пероксида водорода в крови [3–7]. Пероксид водорода, концентрация которого в человеческой крови достигает 30 мкМ [8], рассматривается в качестве наиболее точного индикатора. Также определение его концентрации может использоваться при определении степени воспалительного процесса в организме.

Наиболее совершенным методом непрерывного анализа пероксида водорода является амперометрическая детекция на электродах, модифицированных берлинской лазурью (БЛ). Использование такого датчика в проточно-инжекционной системе позволяет осуществлять анализ пероксида водорода вплоть до концентраций 10⁻⁷ М. Чувствительность анализа составляет 0,5 А/(М·см²) [12].

Повышение чувствительности электрохимического датчика возможно при использовании электродов достаточно малого размера. Электроды, геометрические размеры которых меньше или сравнимы с толщиной диффузионного слоя у их поверхности, называются микроэлектродами. Для таких электродов уже не выполняется предположение, что диффузия реа-

гирующих веществ и продуктов реакции в приэлектродном слое происходит только по нормали к поверхности электрода, т. е. происходит переход от планарной диффузии к полусферической [13,14].

В этой работе мы исследовали аналитические характеристики микроэлектродов, модифицированных берлинской лазурью при определении пероксида водорода в проточно-инжекционной системе. Полученные микроэлектроды были использованы для анализа различных физиологических жидкостей.

Экспериментальная часть

Материалы. Все эксперименты проводились в дистиллированной воде. Используемые в работе неорганические соли (ч. д. а.) приобретены в Реахим (Россия) и Sigma (Германия). Для тестирования модифицированных берлинской лазурью электродов применяли 30 %-ный раствор пероксида водорода фирм Реахим (мед.) (Россия) и Sigma (Германия).

Образцы плазмы пациентов с церебральными патологиями были предоставлены лабораторией диагностики НИИ скорой помощи.

Оборудование. *Электроды.* В работе использованы в качестве рабочих электродов дисковые стеклоуглеродные электроды диаметром 2 мм марки 2500 производства НИИ "Графит" (Россия), запрессованные в тефлон, и золотые микроэлектроды. Микроэлектроды получали путем вклеивания золотой проволоки диаметром 0,125 мм (Goodfellow, Великобритания) в полиэтиленовый катетер для внутрисосудистых вливаний (внешний диаметр 1,1 мм, внутренний диаметр 0,6 мм) с помощью жидкой эпоксидной смолы.

Перед модификацией берлинской лазурью проводили предобработку дисковых рабочих электродов, включавшую полирование порошком оксида алюминия до зеркального блеска (диаметр зерна 3 мкм, затем 0,5 мкм) и последующую обработку электрода суспензией Al₂O₃ в воде. Затем электроды ополаскивали дистиллированной водой и, не высушивая, помещали в ростовой раствор.

Электрохимическая система. Все электрохимические измерения проводили с помощью электрохимической системы модели 1286 (Solartron, Великобритания), соединенной с персональным компьютером IBM, а также на электрохимической системе Autolab (Eco Chemie, Голландия). Обе системы были соединены с трехэлектродной ячейкой, содержащей рабочий электрод, хлорсеребряный электрод сравнения (1 М КСl) и платиновый вспомогательный электрод.

Проточно-инжекционная система. Она состоит из перистальтического насоса Macroflex (LKB Bromma, Швеция) и инжектора с объемом пробы 200 мкл, соединенных с проточной амперометрической ячейкой. Входное отверстие ячейки снабжено хлорсеребряным электродом сравнения в 1 М КСl. В качестве вспомогательного электрода использовалась трубка из коррозионно-стойкой стали, служащая выходным отверстием ячейки. Расстояние между рабочим электродом и соплом ячейки составляло примерно 2 мм. Для тестирования амперометрического сенсора ячейка подсоединялась к потенциостату 641 VA-Detector (Metrohm,

Швейцария), снабженному самописцем марки 19-8004—01 (*Parmacia*, Швеция).

Методы. Электрохимический рост берлинской лазури на поверхности электрода осуществлялся в трех-электродной ячейке с разделенным пространством всех электродов, содержащей рабочий стеклоуглеродный электрод, хлорсеребряный электрод сравнения и платиновый вспомогательный электрод. Предварительно пространство рабочего электрода деаэрировали путем пропускания аргона. Растовый раствор содержал 4 мМ $K_3[Fe(CN)_6]$ и 4 мМ $FeCl_3$ в растворе 0,1 М KCl , 0,1 М HCl . Рост берлинской лазури на поверхности рабочего электрода осуществляли потенциодинамически при значениях потенциала рабочего электрода от +0,3...+0,4 В до +0,7...+0,8 В (х. с. э.). Здесь и далее значения потенциала указаны относительно хлорсеребряного электрода.

Нанесенные на электрод покрытия берлинской лазури активировали путем циклирования модифицированного электрода в районе потенциалов от -0,05 до +0,35 В в растворе 0,1 М KCl , 0,1 М HCl при скорости развертки потенциала 40 мВ/с до получения стабильной вольтамперограммы.

Результаты и обсуждение

Как уже говорилось, для повышения чувствительности можно использовать электроды достаточно малого размера. Было показано [13], что в соответствии с уравнением

$$\frac{1}{i_{cat}} = \frac{\pi r_0}{4nFD_z c_z^*} + \frac{1}{nFkc_z^* KI^0}$$

с уменьшением радиуса электрода плотность регистрируемого тока возрастает.

Для сравнения нами были исследованы аналитические характеристики дисковых электродов, модифицированных БЛ в проточно-инжекционной системе для определения пероксида водорода.

Полученный градуировочный график (рис. 1) линейен в диапазоне концентраций 10^{-7} ... 10^{-3} М. Чувствительность анализа составила $0,5 \text{ A}/(\text{M} \cdot \text{cm}^2)$.

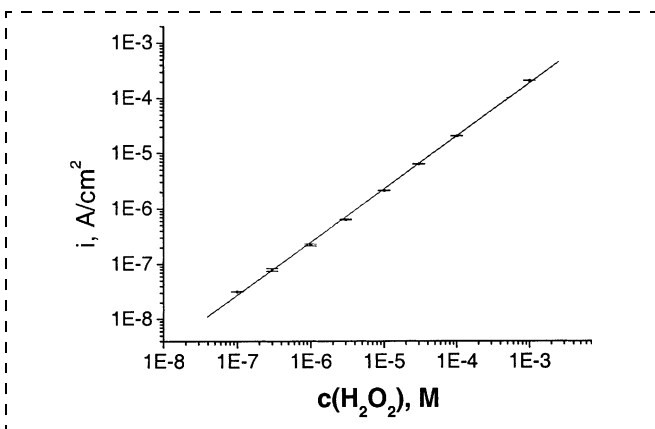


Рис. 1. Градуировочный график определения пероксида водорода в проточно-инжекционном режиме с использованием электрода, модифицированного берлинской лазурью

С целью изучения аналитических характеристик микроэлектродов было проведено электроосаждение берлинской лазури на золотой микроэлектрод с диаметром 125 мкм. Градуировочный график определения пероксида водорода в проточно-инжекционной системе с использованием микроэлектрода, модифицированного БЛ, представлен на рис. 2.

Сила регистрируемого тока очень мала, так при концентрации H_2O_2 10^{-6} М она составляет десятые доли наноампера. Имеющаяся у нас техника не позволяет различать более низкие концентрации вследствие высокого уровня шума. Поэтому предел обнаружения в данном случае составил только 10^{-6} М.

Однако за счет перехода от планарного профиля диффузии определяемого вещества на поверхность электрода к полусферическому профилю чувствительность анализа, отнесенная к площади поверхности электрода, повысилась примерно в 5 раз по сравнению с использованием обычного дискового электрода и составила $2,5 \text{ A}/(\text{M} \cdot \text{cm}^2)$.

Полученные микроэлектроды, модифицированные берлинской лазурью, были использованы для анализа пероксида водорода в физиологических жидкостях. Проводили детекцию добавленного пероксида водорода в плазме крови и ликворе.

В исследуемых жидкостях происходит интенсивное разложение пероксида водорода. При этом скорость разложения снижается при разбавлении плазмы буфером (в 2, 5 и 10 раз). При разбавлении плазмы буфером в 100 и более раз разложения пероксида водорода не наблюдается. Данная реакция может быть следствием присутствия фермента каталазы в плазме. По литературным данным известно, что азид натрия ингибирует действие каталазы. Поэтому были проведены эксперименты по детекции добавленного пероксида водорода в плазме крови в присутствии азид натрия. Показано, что в данной системе заметного разложения пероксида водорода не происходит. То есть белковая часть плазмы не оказывает заметного влияния на реакцию восстановления пероксида водорода, катализируемого берлинской лазурью.

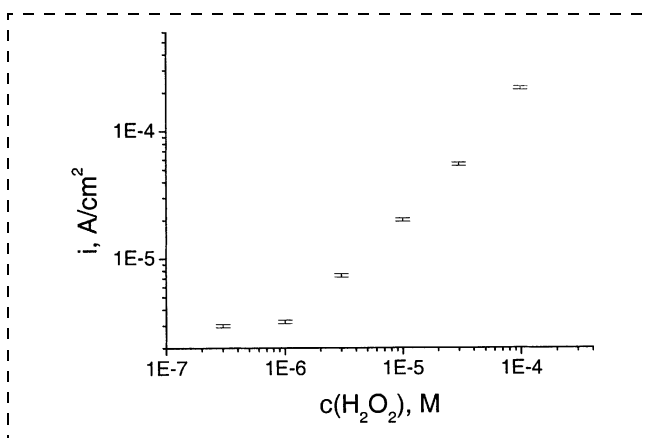


Рис. 2. Градуировочный график определения пероксида водорода с использованием микроэлектрода, модифицированного берлинской лазурью

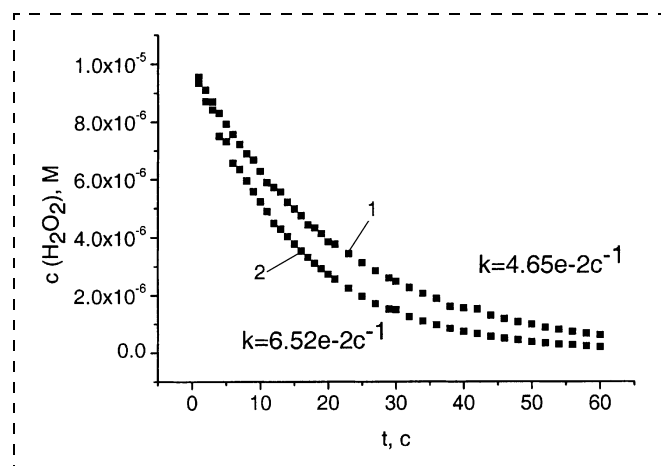


Рис. 3. Кинетика разложения пероксида водорода в присутствии плазмы крови пациентов с церебральной патологией:

1 — в тяжелом состоянии; 2 — в состоянии средней тяжести

Изучалась скорость разложения добавленного пероксида водорода в плазме крови и ликворе пациентов с церебральной патологией в зависимости от степени тяжести заболевания. Экспериментальные данные были аппроксимированы кривыми первого порядка и вычислены соответствующие константы разложения пероксида водорода (рис. 3). Было найдено, что константы разложения пероксида водорода в плазме у пациентов в тяжелом состоянии ниже по сравнению с константами в плазме у пациентов в состоянии средней тяжести.

Выводы

Таким образом, в работе показано, что при использовании микроэлектродов, модифицированных

берлинской лазурью, чувствительность анализа возрастает примерно в 5 раз.

Микроэлектроды были применены для определения пероксида водорода в плазме крови пациентов НИИ скорой помощи им. Н. В. Склифосовского. Показано, что данные по кинетике разложения пероксида водорода позволяют выявлять различие в степени тяжести состояния больных с церебральными патологиями.

Авторы благодарят за финансовую поддержку грант HATO SA (PST. CLG.97864)6607/FP.

Список литературы

1. Wang Y., Huang J., Zhang C., Wei J., Zhou X. // Electroanalysis. 1998. N 10 P. 776—778.
2. Nowall W. B., Kuhr W. G. // Electroanalysis. 1997. N 9. P. 102—109.
3. MacCarthy P. A., Shah A. M. // Coronary Artery Disease. 2003. N 33. P. 109—113.
4. Rodrigo R., Rivera G. // Free Radical Biology and Medicine. 2002. N 33. P. 409—422.
5. Sohal R. S., Mockett R. J., Orr W. C. // Free Radical Biology and Medicine. 2002. N 33. P. 575—586.
6. Yang T. T. C., Devaraj S., Jialal I. // Journal of Clinical Ligand and Assay. 2001. N 24. P. 13—24.
7. Yorek M. A. // Free Radical Research. 2003. N 37. P. 471—480.
8. Halliwell B., Clement M. V., Londa L. H. // FEBS Letters. 2004. N 486. P. 10—13.
9. Karyakin A. A., Gitelmacher O. V., Karyakina E. E. // Analytical Chemistry. 1995. N 67. P. 2419—2423.
10. Karyakin A. A., Karyakina E. E. // Sensors and Actuators. 1999. B 57. P. 268—273.
11. Karyakin A. A., Karyakina E. E., Gorton L. // Analytical Chemistry. 2000. N 72. P. 1720—1723.
12. Karyakin A. A. // Electroanalysis. 2001. N 13. P. 813—819.
13. Дамаскин Д. Д., Петрий О. А., Цирлина Г. А. // Электрохимия. 2001. N 412. P. 433—442.
14. Shaojun Dong and Guangli Che. // J. Electroanal Chem. 1991. 309. P. 103—114.

ИНФОРМАЦИЯ

ПРЕМИЯ 2004 Г. FROST&SULLIVAN ЗА ПИОНЕРСКИЕ РАЗРАБОТКИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ОПТИЧЕСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ MEMS СУБСИСТЕМ, КОМПОНЕНТОВ И ТЕХНОЛОГИЙ

Лондон, 20 июля 2004 г. Премия 2004 г. Frost&Sullivan за пионерские разработки по совершенствованию оптических и промышленных MEMS субсистем, компонентов и технологий присуждена фирме Colibrys SA. Этой премией отмечен успех Швейцарской компании в объединении инновационных техноло-

гий со стратегией маркетинга интеллектуальной продукции.

"Успех фирмы Colibrys SA заключается в нахождении оптимальной стратегии маркетинга и технологии, которая основана на высоком качестве MEMS продуктов и технологии их создания", — отмечает аналитик Frost&Sullivan Jagan Ramaswami. — "Продукция компании имеет мощный рыночный потенциал, и при менеджменте на долгосрочную перспективу Colibrys SA представляется лидером MEMS рынка".

Имея весь спектр возможностей от конструирования, производства чипов, сборки до тестирования и консультационных услуг по технологии, Colibrys находится среди лидеров, способных предложить всестороннюю поддержку. Ее полный цикл решений простирается от разработки изделия до серийного производства.

Colibrys строит работу на стратегии интеллектуальной технологии, являющейся сплавом разработки изделий с практическим опытом и знаниями бизнеса. Компания успешно выдержала апробирование в MEMS промышленности в 2000 и 2001 гг.

"Уровень развития компании в настоящее время позволяет предложить производство средних объемов заказных или стандартных компонентов на выбор, либо больших объемов заказных изделий. Компания также запустила хорошо отлаженное сборочное производство", — развивает свою мысль Ramaswami, — "такая форма является хорошей моделью для фирм без собственных производственных мощностей, которые могут предлагать свои разработки, что привлекательно для субподрядных компаний".

Обязательство компании поддерживать развитие технологии находит отражение в номенклатуре ее продукции. Список включает в себя всю гамму от емкостных акселерометров, элементов оптической связи для промышленных целей, оптических линз, микрооптических осветительных систем до высокоскоростных печатающих головок.

Кроме предложения по предоставлению полной технологической производственной линейки, компания демонстрирует существенное продвижение в производстве пластин и в возможностях их тестирования. Colibrys быстро переросла свой основной сегмент рынка по производству высокотехнологичных акселерометров для целей военной навигации, сейсмического мониторинга, обеспечивая также MEMS приборами и другие сектора. Среди них потребители в навигации, медицине, телекоммуникации и промышленный сектор.

Высокие достижения технологии вкупе с четкой и ясной рыночной стратегией поставили Colibrys на путь постоянного роста, что сделало фирму достойным получателем премии 2004 г. Frost&Sullivan в области MEMS.

Подробная информация www.colibrys.com или Colibrys.SA

Sean.neylon@colibrys.com

Tel. +41 32 720 5424

Marcom Assistant

Nathalle.odietjaoui@colibrys.com

Tel: +41 32 720 5990

ПРОГРАММА "КОНСТРУИРОВАНИЕ В МИКРО- И НАНОПРОИЗВОДСТВЕ"

Европейский Союз (ЕС) предполагает инвестировать 6,2 млн евро на программу "Конструирование в микро- и нанопроизводстве", рассчитанную на 4 года.

Берлин, Германия, 3 сентября 2004 г.: Программа "Конструирование в микро- и нанопроизводстве" (PATENT-DfMM), запущенная в январе 2004 г., будет финансироваться из программы Общества информационных технологий Европейского сообщества в течение 4 лет. Проект базируется на высоком уровне своих 24 преимущественно академических партнеров и имеет целью направить усилия инженерной науки этой области на решение проблем, связанных с производством и надежностью изделий на базе микро- и нанотехнологии еще до создания прототипа или опытного образца.

Промышленный Консультативный Совет (IAB) управляет проектом PATENT-DfMM в целях придания исследованиям ориентации на применимость в промышленности. "Сегодня большинство микросистем сконструированы без должного рассмотрения проблем конечного тестирования, надежности и промышленного воспроизводства", — сказал Бенедетто Винга, бизнес-директор подразделения MEMS, STMicroelectronics Italy и председатель IAB. — "Эти проблемы рассматриваются бессистемно, только при явном их появлении. Общение исследовательских коллективов важно для выработки методологии конструирования, которая увеличит вероятность успеха и

уменьшит время выхода на рынок продукции, основанной на микро- и нанотехнологиях".

Проект предполагает интегрировать изолированные и разобщенные группы с ценнейшим опытом, создать критическую массу в сфере конструирования в микро- и нанопроизводстве в Европе и дать доступ исследователям к современному инструментарию и технологиям. "PATENT-DfMM обеспечит прямой сервис промышленности в форме универсального центра обслуживания с акцентом на небольшие и малые компании", — объяснил проект Эндрю Ричардсон, директор Центра микросистемных разработок, университет Ланкастер, Великобритания. — "Эти услуги будут основаны на сочетании опыта и ресурсов нового технического сообщества, сформированного проектом".

Проект PATENT-DfMM является инициативным. Этот проект будет базироваться на специфических потребностях промышленности, сформулированных основными коммерческими представителями в течение последних нескольких лет и изучаемыми на заседаниях рабочей группы "NEXUS Metrology" на секции "Моделирование конструкций". Планируется тесное сотрудничество с другими европейскими и мировыми проектами, как например, MEMS Industry Group в США.

Развивается также сопутствующая образовательная программа, посвященная вопросам DfMM в промышленности и академии. Первая летняя школа "Конструирование в микро- и нанопроизводстве" прошла в ISLI, Ливингстон, Шотландия, 13—15 сентября 2004 г. Дополнительная информация www.patent-dfmm.org.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ "МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА" В 2004 г.

ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

- Алехин В. А.** Одномерные микрооптикоэлектромеханические системы и их применение в устройствах отображения и регистрации информации. № 11.
- Васильев А. А.** Микрометрические полупроводниковые сенсоры на тонких диэлектрических мембранах. № 10.
- Вернер В. Д., Мальцев П. П., Сауров А. Н., Чаплыгин Ю. А.** Синергетика миниатюризации: микроэлектроника, микро-системная техника, нанoeлектроника. № 7.
- Горлов М. И., Андреев А. В.** Встроенные датчики влажности в подкорпусном пространстве интегральных схем. № 3.
- Зайцев Н. А.** Микрозеркала в кремниевом кристалле. № 12.
- Иванов А. А., Мальцев П. П.** Микросистемная техника — основа научно-технической революции в военном деле. № 10.
- Катыс П. Г., Катыс Г. П.** Микрометрические дисплеи, формирующие проекционные изображения. № 3.
- Косцов Э. Г., Багинский И. Л., Буханец Д. И., Кашеев Э. Л.** Электростатический двигатель для быстродействующих микромеханических устройств. № 4.
- Котов В. Н., Нешадим И. Л., Борисов С. Э., Клиндухов В. Г., Черепанин И. И.** Комплект микроэлектронных унифицированных датчиков физических величин для электронных и электрических систем автомобильной техники. № 6.
- Лучко В. А.** МЭМС-технология переворачивает представления о технике инфракрасного видения. № 2.
- Мариничев В. Ю., Механцев Е. Б.** Интегральный электрический микронасос. № 12.
- Михайлов П. Г.** Исследования по созданию высокотемпературных сенсорных элементов и структур. № 8.
- Скалон А. И.** Разработка принципов построения микромеханических датчиков первичной информации интегрального уравнивания с использованием оптоэлектронных и электромагнитных элементов. № 4.
- Суховеев С. П.** Волоконные МЭМС и НЭМС. № 1.
- Татмышевский К. В.** Механолюминесцентные (светогенерационные) сенсорные элементы для современных информационно-измерительных технологий. № 12.
- Телец В. А.** Микроэлектромеханические инерционные преобразователи физических величин: типовые варианты исполнения. № 2.
- Телец В. А., Негина Ю. С., Орлов А. А.** Изготовление трехмерных МЭМС методами термокомпрессионной сварки. № 3.
- Шалобаев Е. В., Монахов Ю. С.** Обзор разработок микроактюаторов на основе лазерных технологий и предложения по перспективам их развития. № 1.
- Шапкин В. И., Вопилкин Е. А., Востоков Н. В., Климов А. Ю., Рогов В. В., Гусев С. А., Шулепова И. Ю.** Изготовление микроконсольей и управление их изгибом. № 9.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

- Амиров И. И., Морозов О. В., Изюмов М. О., Кальнов В. А., Орликовский А. А., Валиев К. А.** Плазмохимическое травление глубоких канавок в кремнии с высоким аспектным отношением для создания элементов микромеханики. № 12.
- Бабаевский П. Г., Жуков А. А., Жукова С. А.** Влияние химической обработки на структуру и свойства тонких полиимидных пленок и покрытий и скорость ВЧ-плазменного травления "жертвенного" слоя в технологии микросистем. № 5.
- Берикашвили В. Ш., Григорьянц В. В., Ключник Н. Т., Кочмарев Л. Ю., Шилов И. П., Яковлев М. Я.** СВЧ-плазмохимическое осаждение планарных волноводных структур на основе кварцевого стекла. № 8.
- Бутко А. В., Веселов А. Г., Высоцкий С. Л., Кожевников А. В., Филимонов Ю. А., Никитов С. А.** Исследование спин-волновых возбуждений в решетках из пермаллоевых микрочастич. № 12.
- Парилов А. А., Поддубнов В. В.** Полусферические магнитотвердые пленки сплава Nd—Fe—В и их применение в микросистемах. № 6.
- Рембеза С. И., Свистова Т. В., Рембеза Е. С., Миласечко В. В.** Влияние примеси платины на свойства пленок диоксида олова, используемых в датчиках газов. № 3.

- Сеченов Д. А., Агеев О. А., Светличный А. М., Клово А. Г.** Влияние режимов быстрой термообработки на температурные поля в гетерогенных структурах металл/карбид кремния. № 9.
- Старков В. В., Гаврилин Е. Ю., Вяткин А. Ф.** Исследование нуклеационной стадии процесса анодного травления кремния. № 12.
- Шалобаев Е. В., Монахов Ю. С., Старжинский В. Е., Шилько С. А.** Технология изготовления зубчатых колес и передач для микроэлектромеханических систем. Технологии поверхности и объемной микромеханики. № 7.
- Шалобаев Е. В., Монахов Ю. С., Старжинский В. Е., Шилько С. А.** Технология изготовления зубчатых колес и передач для микроэлектромеханических систем. Технологии индивидуального формообразования микромеханики. № 8.
- Щербаков А. В., Мельников Л. А.** Стекловолоконные технологии в микросистемной технике и фотонике. № 6.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МСТ

- Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В.** Комбинированная двухзонная модель гетероструктуры с одним туннельным переходом и протяженными приконтактными областями. № 9.
- Афанасьев А. М., Чуев М. А., Медведев П. Г., Пустовойт В. И.** О предельной разрешающей способности аподизированных дифракционных фильтров. № 4.
- Балан Н. Н.** Определение упругих свойств подвижных элементов MEMS-структур. № 2.
- Бондаренко С. Г., Векшин М. М., Кулиш О. А., Яковенко Н. А.** Пространственный оптический разделитель ТЕ- и ТМ-волн на основе металлодиэлектрического двухлучевого волноводного интерферометра. № 12.
- Драгунов В. П.** Влияние формы упругого элемента на характеристики микроэлектромеханических систем. № 1.
- Драгунов В. П.** Нелинейная динамическая модель упругого элемента микромеханических систем. № 10.
- Драгунов В. П.** Нелинейная модель упругого элемента микроэлектромеханических систем. № 6.
- Драгунов В. П.** Нелинейность упругих элементов микромеханических систем. № 5.
- Евлюхин А. Б., Герке М. Н., Евлюхина Е. В.** Теоретическая модель зондового излучения в ближнеполевой оптической микроскопии однослойной наноструктуры. № 5.
- Евлюхин А. Б., Фадеева И. Ю.** Моделирование изображений в сканирующей ближнеполевой оптической микроскопии собирающей и облучающей конфигураций. № 3.
- Козлов А. В., Тихонов Р. Д.** Отрицательная чувствительность по току биполярного магнитотранзистора. № 11.
- Козлов А. Г.** Моделирование стационарного распределения температуры в газовых микросенсорах на термически изолированных структурах. № 2.
- Космодемьянская Г. Н., Сорокина С. И.** Упрощенные модели движения микрокапсулы в трубках малого диаметра. № 7.
- Кравченко И. В., Коноплев Б. Г., Рындин Е. А.** Моделирование распределения температуры в конвективном микроакселерометре. № 11.
- Крупкина Т. Ю.** Методика анализа пьезорезистивного эффекта в элементах микросистемной техники с использованием пакета программ ISE TCAD. № 6.
- Новиков С. Г., Гуринов Н. Т.** Схемотехнические аналоги симметричных негатронов. № 12.
- Слесарев Ю. Н.** Искажения при термомагнитной записи информации. № 1.
- Цветков Ю. Б.** Анализ совместимости слоев в производстве изделий микросистемной техники. № 8.
- Шауцуков А. Г., Загидулин Ю. С.** Моделирование процесса радиационно-стимулированной диффузии в ионно-легированных слоях. № 4.
- Шелепин Н. А.** Основные принципы создания SPICE-моделей микроэлектромеханических систем. № 9.

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

- Кобяков И. Б., Гамкрелидзе С. А., Сперанский А. А.** Трехкомпонентные векторные вибродатчики нового поколения для оперативной диагностики силовых агрегатов. № 12.

- Кульчин Ю. Н., Каменев О. Т., Петров Ю. С. Восстановление распределения поля амплитуды поперечных колебаний поверхности с использованием распределенной волоконно-оптической измерительной сети. № 10.
- Лутченко В. Г. Микроминиатюрные электродвигатели постоянного тока. № 4.
- Синютин С. А. Интеллектуальный датчик для регистрации редких событий. № 4.
- Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Камышанский А. С. Измерение скорости движения объекта по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера на квантоворазмерных структурах. № 2.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

- Агафонов В. М., Криштоп В. Г. Исследование АЧХ молекулярно-электронного преобразователя с новой геометрией. № 9.
- Альтшуллер Г. М., Вакс В. Л., Гайкович К. П. СВЧ сканирование подповерхностной структуры живых тканей. № 4.
- Вагин М. Ю., Карякин А. А. Электрохимические сенсоры для прямой регистрации аффинных взаимодействий на основе самоорганизующихся слоев молекул ПАВ. № 10.
- Козлов В. А., Терентьев Д. А. Коррекция частотной характеристики молекулярно-электронного акселерометра вращательных движений в области инфранизких частот. № 10.
- Пуганова Е. А., Комаров А. В., Вагин М. Ю., Карякина Е. Е., Карякин А. А. Использование микроэлектродов, модифицированных берлинской лазурью для определения пероксида водорода в физиологических жидкостях. № 12.
- Резник А. Н., Юрасова Н. В. Подповерхностная термометрия биологических сред по данным ближнепольного СВЧ-зондирования. № 4.
- Соборовер Э. И., Зубков И. Л. Плосковолноводный оптический химический сенсор для мультисенсорной системы атмосферного мониторинга. № 12.
- Урбайтис М. Ф. Обнаружение и идентификация молекулярных и атомных примесей без предварительной подготовки объекта исследования в реальном масштабе времени. № 6.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Алфимов С. М., Быков В. А., Гребенников Е. П., Желудева С. И., Мальцев П. П., Петрунин В. Ф., Чаплыгин Ю. А. Развитие в России работ в области нанотехнологий. № 8.
- Аристов В. В., Куюмчян А. В., Суворов А. Ю., Ishikawa T., Исоян А. А., Труни К. Т., Sarkisian E. Восстановление Фурье-голограммы с помощью фазовой зонной пластинки для рентгеновского излучения. № 11.
- Бакунов М. И., Бодров С. Б. Межмодовая трансформация в зонде ближнепольного оптического микроскопа. № 6.
- Балабанов Д. Е., Никитов С. А. Исследование двухмерных магнитных полей рассеяния методом компьютерной магнитооптической визуализации. № 11.
- Балан Н. Н. Повышение точности голографических измерений параметров MEMS—NEMS-структур путем использования нелинейных эффектов. № 7.
- Бахтизин Р. З., Ву К.-Х., Шюе Ч.-Ж., Шюе Ч.-К., Нагао Т., Сакурай Т. Сканирующая туннельная микроскопия начальных стадий роста пленок Ag на поверхности GaN (0001). № 4.
- Бибишкин М. С., Забродин И. Г., Зуев С. Ю., Клоенков Е. Б., Пестов А. Е., Салашенко Н. Н., Чехонадских Д. П., Чхало Н. И. Лабораторные методы исследования многослойных зеркал для экстремального ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения. № 11.
- Бобринецкий И. И., Неволлин В. К., Чаплыгин Ю. А. Логические ключи на основе пучков однослойных углеродных нанотрубок. № 7.
- Валиев К. А., Бочаров Л. Ю., Мальцев П. П., Троицкий И. И. Квантовая технология — новые аспекты нанотехнологии. № 4.
- Гайкович К. П., Дряхлушин В. Ф. Исследование структуры ближнепольного излучения полупроводникового лазера. № 3.
- Гайкович К. П., Миронов В. Л. Восстановление поверхностной плотности электронных состояний пиролизического графита по данным сканирующей туннельной микроскопии. № 2.
- Гришин М. В., Далидчик Ф. И., Ковалевский С. А., Колченко Н. Н., Самойленко А. А. Изучение электронных ловушек в тонких диэлектрических пленках методом сканирующей туннельной спектроскопии. № 7.

- Далидчик Ф. И., Гришин М. В., Ковалевский С. А. Особенности электронного строения взаимодействующих нанополупроводниковых частиц. № 5.
- Дедков Г. В., Кясов А. А. Новые аспекты флуотационно-электромагнитного взаимодействия движущихся нанозондов с поверхностью. № 9.
- Карагузов В. И. Нанокриогенные технологии. № 10.
- Ландышев А. В., Лаврентьев А. А., Ландышев В. А. Исследование концентрационных неоднородностей в сплавах $\text{Si}_{0,68}\text{Ge}_{0,32}$. № 9.
- Ломаева С. Ф., Ломаев И. Л. Метод измерения толщины покрытий на поверхности наноструктурных материалов с использованием АСМ и РФЭС. № 8.
- Мокеров В. Г. Гетероструктурная СВЧ-электроника — новые перспективы нанoeлектроники. № 10.
- Нохрин А. В., Макаров И. М., Лопатин Ю. Г. Особенности методики исследования деформационно-стимулированного роста зерен в нано- и микрокристаллических сверхпластичных алюминидовых сплавах методом атомно-силовой микроскопии. № 5.
- Панфилов Ю. В., Самойлович М. И., Зилова О. С. Исследование поверхности опаловой матрицы с тонкопленочными покрытиями. № 11.
- Самойлович М. И., Клещева С. М., Белянин А. Ф., Житковский В. Д., Цветков М. Ю. Трехмерные наноконфигурации на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема. № 6, 7, 8.
- Серов И. Н., Ионг М. А., Кощеев С. В., Марголин В. И., Мошников В. А., Чеснокова Д. Б. Анализ структурных характеристик нанокристаллических слоев селенида свинца. № 8.
- Серов И. Н., Лукьянов Г. Н., Марголин В. И., Потсар Н. А., Солтовская И. А., Фантиков В. С., Туник В. А. Получение и исследование наноразмерных пленок меди с фрактальной структурой. № 1.
- Тодуа П. А., Быков В. А., Волк Ч. П., Горнев Е. С., Желкобаев Ж., Зыкин Л. М., Ишанов А. Б., Календин В. В., Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Прохоров А. М., Раков А. В., Саунин С. А., Черняков В. Н. Метрологическое обеспечение измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах и их внедрение в микроэлектронику и нанотехнологию. № 1, 2, 3.
- Труфанов А. И., Батурин А. С., Лещуков М. Ю., Чадаев Н. Н., Шешин Е. П. Эмиссионные характеристики источников света с автокатодом на основе пучка углеродных волокон. № 3.
- Фролов В. Д., Заведеев Е. В., Пименов С. М., Конов В. И. Микроскопические свойства тонких пленок на основе Ni—C наноконфигураций. № 4.
- Царева С. Ю. Влияние природы катализатора и параметров синтеза на морфологию многослойных углеродных нанотрубок, получаемых методом каталитического пиролиза углеродородов. № 1.
- Шевченко В. Я. О терминологии: наночастицы, наносистемы, наноконфигурации, нанотехнологии. № 9.
- Шляев П. А., Павлов Д. А., Хохлов А. Ф. Методы расчета фрактальной размерности СЗМ-изображений. № 3.
- Щеглов Д. В., Родякина Е. Е., Латышев А. В., Асеев А. Л. Новые возможности нанолитографии зондом атомно-силового микроскопа. № 9.

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

- Адамов Ю. Ф., Сомов О. А., Шевченко Е. А. Синхронизация и связность сигналов в системах на кристалле. № 11.
- Адамов Ю. Ф., Сомов О. А., Шевченко Е. А. Системы на кристалле в современной электронике. № 5.
- Адамов Ю. Ф., Сомов О. А., Шевченко Е. А. Современная технология и производство систем на кристалле. № 6.
- Ерохин В. В. Архитектурно-зависимое самотестирование сложных функциональных блоков. № 5.

ИНФОРМАЦИЯ

- Краткие сведения о редакционной коллегии журнала "Микросистемная техника". № 1, 10.
- Порядок оформления статей, направляемых в журнал "Микросистемная техника". № 6.
- Смирнов Д. Ю., Мальцева С. В. Проектирование и управление Интернет-ресурсами сайта журнала "Микросистемная техника". № 8.

Страничка РФФИ. № 1—5, 7—11.

CONTENTS

Tatmyshevskii K. V. *Classification and Informative Properties of the Mechanoluminescent Pressure Sensors* 4

The possible classification of the mechanoluminescent pressure sensors are considered in this paper. The peculiarities of the processing sensors' output optical signals are proposed with the purpose of the improvement informative properties.

Zaytsev N. A. *Micromirror in Chip* 10

In this article the micromirror in chip of MOEMS-technology.

Marinichev V. Ju., Mekhantsev E. B. *Integral Electric Micropump* 12

The proposed structure has working electrodes which are mono-crystal wafer of silicon with V-shaped through holes and metal film. The electrodes are separated by thin dielectric layer. The dependence of the forces which act to a dipole liquid with geometric sizes of the structure was estimated by the proposed mathematic model. The ways of its optimization were planned.

Amirov I. I., Morozov O. V., Izumov M. O., Kalnov V. A., Orlikovsky A. A., Valiev K. A. *Plasmachemical Etching of High Aspect Ratio Deep Trenches in the Silicon for the Creation of the Various Elements of micromechanics* 15

Results of the investigations of etch process for high aspect ratio ($A > 20$) deep trenches in silicon in $SF_6 + C_4F_8$ plasma of rf inductive discharge in chopping regimes of SF_6 are presented. Process characteristics of etching of thin ($d = 3 \mu m$) and width ($60 \mu m$) trenches in Si from of RF power bias, passivity and etching times are determined. The typical defects of the deep trench etching are shown. The optimal conditions of deep trench formation with vertical walls are determined.

Butko A. V., Veselov A. G., Vysotsky S. L., Kozhevnikov A. V., Filimonov Yu. A., Nikitov S. A. *Investigation on the Spin-Wave Excitations in Arrays of Permalloy Particles* 19

Spin-wave excitation spectrum of tangentially magnetized arrays of micron size rectangular particles of permalloy was investigated using ferromagnetic resonance. Some additional to thin film case peaks were found. It was shown that their arising is connected with the excitation of non-uniform resonances of backward volume magnetostatic waves and dipole-exchange magnetostatic surface waves. The influence of the rotation of arrays in the magnetization plane on position and intensity of the peaks was also studied.

Starkov V. V., Gavrilin E. Yu., Vyatkin A. F. *Investigation of a Nucleation of Deep Anodic Etching in silicon* 23

In the present paper the peculiarities of nucleation stage of deep anodic etching of silicon are studied. The dependence of the depth of etching crater obtained for silicon samples of p-type conduction with

different resistivity upon the regimes of anodic etching processes has been determined. On the basis of the experimental results obtained the "bottleneck" effect observed both at the first and second stages of pore growth is explained.

Novikov S. G., Curin N. T. *Schematic Analogues of Symmetric Negatrons* 27

In this article, methods and principles of schematic negatron analogues construction were examined. Symmetric volt-ampere characteristic realization in examined analogues was achieved wherewith contrary-consecutive, contrary-parallel and integrated including of unipolar negatrons. Modelling of obtained schemes was realized with DesignLab Eval 8 software.

Bondarenko S. G., Vekshin M. M., Kulish O. A., Yacovenko N. A. *TE-TM Wave Splitter on Metallocdielectric Two-Beam Waveguide Interferometer* 31

A new integrated-optic polarization splitter on two beam Mach-Zehnder interferometer is proposed and simulated. Principle of operation is based on polarization-sensitive phase shift of guided waves, propagating through both arms of interferometer. One arm includes metal-clad waveguide with specially chosen parameters.

Kobiakov I. B., Gamkrelidze S. A., Speranski A. A. *Triaxial Vector Vibroaccelerometers of New Generation for Operative Diagnostic of Power Aggregates* 35

A basically novel type of a measuring means — triaxial with a one sensitive element (vector) piezoelectric vibroaccelerometer. This domestic development for the first time provide possibilities for obtaining complete (true) data about vibration.

Soborover E. I., Zubkov I. L. *Planar Waveguide Optical Chemical Sensor as Multisensor for Monitoring of Atmospheric Pollutants* 38

The possibility of using planar waveguide optical chemical sensor with a polymer film of polymethyl methacrylate as a waveguide and a polymer film of functional poly(dimethyl siloxane) as a sensitive layer, as multisensor four gases — a main priority atmospheric pollutants (oxide of carbon (CO), ammonia (NH₃), dioxide of sulfur (SO₂) and hydrogen sulfide (H₂S)) has been described.

Puganova E. A., Komarov A. V., Vagin M. Yu., Karyakina E. E., Karyakin A. A. *Use of the Microelectrodes Modified by Prussian Blue for Hydrogen Peroxide Detection in Physiological Liquids* 42

Analytical performances of microelectrodes modified by Prussian Blue were investigated in comparison with disk electrodes to hydrogen peroxide detection. Sensitivity of hydrogen peroxide detection was $2,5 A/(M \cdot cm^2)$, which five times higher than for disk electrodes. Applications of obtained microelectrodes modified by Prussian Blue are shown for hydrogen peroxide detection in physiological liquids.

For foreign subscribers:

Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(095) 284-5008. Fax: +7(095) 681-3798

The journal bought since november 1999.

Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev

ISSN 1684-6419.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(095) 269-5510.

E-mail: it@novtex.ru; <http://www.microsystems.ru>

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4/1. Телефон редакции журнала (095) 269-5510. E-mail: it@novtex.ru

Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати. Свидетельство о регистрации № 018929 от 10.06.99.

Дизайнер Т.Н. Погорелова. Технический редактор И.С. Павлова. Корректор Ю. Н. Рыбакова

Сдано в набор 01.10.2004. Подписано в печать 05.11.2004. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Усл. кр.-отт. 7,84. Уч.-изд. л. 7,25. Заказ 1888. Цена договорная

Отпечатано в Подольской типографии — филиал ОАО "ЧПК", 142110, г. Подольск, ул. Кирова, 15