

MCT

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 3 ✦ 2004**МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

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

Издается с 1999 г.
ISSN 1684-6419

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционная коллегия:

Антонов Б. И.

Аристов В. В.

Белоус А. И.

Быков В. А.

Васильев А. А.

Васильев В. В.

Волчихин В. И.

Гапонов С. В.

Горнев Е. С.

Градецкий В. Г.

Журавлев П. В.

Захаревич В. Г.

Калиев И. А.

Кальнов В. А.

Карякин А. А.

Климов Д. М.

Кузин А. Ю.

Лифшиц В. Г.

Мокеров В. Г.

Мокров Е. А.

Никитов С. А.

Норенков И. П.

Панич А. Е.

Панфилов Ю. В.

Петросян 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.

Чаплыгин Ю. А.

Редакция:

Безменова М. Ю.

Григорин-Рябова Е. В.

Лысенко А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ**ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ**

| | |
|---|----|
| Телец В. А., Негина Ю. С., Орлов А. А. Изготовление трехмерных МЭМС методами термокомпрессионной сварки | 2 |
| Катыс П. Г., Катыс Г. П. Микросистемные дисплеи, формирующие проекционные изображения | 7 |
| Горлов М. И., Андреев А. В. Встроенные датчики влажности в подкорпусном пространстве интегральных схем | 12 |

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

| | |
|--|----|
| Евлюхин А. Б., Фадеева И. Ю. Моделирование изображений в сканирующей ближнеполевой оптической микроскопии собирающей и облучающей конфигураций | 14 |
|--|----|

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

| | |
|--|----|
| Рембеза С. И., Свистова Т. В., Рембеза Е. С., Милашечко В. В. Влияние примеси платины на свойства пленок диоксида олова, используемых в датчиках газов | 21 |
|--|----|

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

| | |
|--|----|
| Тоду П. А., Быков В. А., Волк Ч. П., Горнев Е. С., Желкобаев Ж., Зыкин Л. М., Ишанов А. Б., Каледин 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 (III часть) | 25 |
| Труфанов А. И., Батурина А. С., Лешуков М. Ю., Чадаев Н. Н., Шешин Е. П. Эмиссионные характеристики источников света с автокатодом на основе пучка углеродных волокон | 32 |

| | |
|--|----|
| Шиляев П. А., Павлов Д. А., Хохлов А. Ф. Методы расчета фрактальной размерности СЗМ-изображений | 35 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Гайкович К. П., Дряхлушин В. Ф. Исследование структуры ближнепольного излучения полупроводникового лазера | 39 |
|--|----|

| | |
|--------------------------|----|
| СТРАНИЧКА РФФИ | 43 |
|--------------------------|----|

| | |
|--------------------|----|
| Contents | 48 |
|--------------------|----|

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

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Строгинский пер., 4. Телефон редакции журнала (095) 269-5510. E-mail: it@novelex.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 М. Г. Джавадян

Сдано в набор 25.12.2003. Подписано в печать 05.02.2004. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Усл. кр.-отт. 7,84. Уч.-изд. л. 7,41. Заказ 335. Цена договорная

Отпечатано в Подольской типографии ГУП ЧПК, 142110, г. Подольск, ул. Кирова, 25

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 621.3.049.77

**В. А. Телец, д-р техн. наук, Ю. С. Негина,
А. А. Орлов,**
ФГУП "22 ЦНИИ Минобороны России",
г. Мытищи Московской области

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ МЭМС МЕТОДАМИ ТЕРМОКОМПРЕССИОННОЙ СВАРКИ

Представлен обзор трех наиболее часто применяемых при производстве объемных МЭМС-устройств методов термокомпрессионной сварки кремниевых пластин и других материалов.

Термокомпрессионная сварка кремниевых пластин вошла в число важнейших технологических операций процесса производства микроэлектромеханических систем (МЭМС) и их элементов, которые находят широкое применение в технике (от акселерометров в автомобильных подушках безопасности и резонансных гироскопов до биомедицинских микрофорсунок, устройств бытовой электроники, телекоммуникаций, хранения данных, игр и др.) [1].

На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) показан кремниевый пьезорезистивный датчик абсолютного давления фирмы Bosch (Германия), который используется в электронных автомобильных системах контроля и управления подачей топлива. По установленному с помощью датчика уровню давления в топливной магистрали бортовой компьютер проводит расчет эффективного количества топлива и управляет процессом его подачи в блок цилиндров автомобиля. Датчики выполняются по технологии анодной термокомпрессии (спекания) кремниевых и стеклянной подложек. Стеклянная опора обеспечивает защиту датчика от тепловых и механических напряжений.

На рис. 2, 3 (см. вторую сторону обложки) и на рис. 4 представлены примеры изготовления МЭМС-датчиков с использованием технологии термокомпрессионной сварки ведущими мировыми производителями — фирмами Ford Microelectronics ISAAC, Motorola Sensor Products Division, Delphi-Delco Electronic Systems (США). Изделия выполнены на основе кремниевых пластин, уровень па-

раметров которых соответствует требованиям, предъявляемым к технологическому процессу изготовления сверхбольших интегральных микросхем (СБИС).

Выполнено ли МЭМС-устройство путем травления в объеме кремния или в приповерхностных поликремниевых слоях путем микромеханической обработки, технология термокомпрессионной сварки является ключевой и открывает большие возможности для массового производства компонентов микросистемной техники — как микромеханических, так и электронных.

Конструктивно МЭМС-устройства могут выполняться в герметичных корпусах, которые обеспечивают эффективную защиту от внешних воздействий. Кроме того, при необходимости чувствительный элемент (ЧЭ) датчика может быть отделен от электронной части прибора, что снижает вероятность влияния на нее избыточного механического воздействия входной измеряемой физической величины.

Процент выхода годных изделий, выполненных термокомпрессионной сваркой, достаточно высок, что обеспечивает их высокое исходное качество и надежность при сравнительно низких стоимостных показателях.

В устройстве, показанном на рис. 2 (см. вторую сторону обложки), ЧЭ акселерометра выполнен на основе "толстой" кремниевой подложки (масса

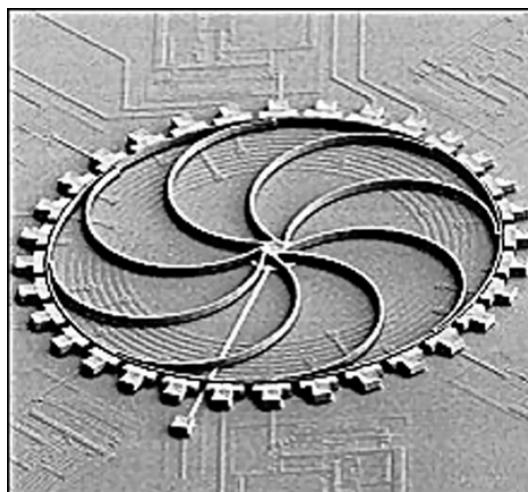


Рис. 4. Внешний вид ЧЭ автомобильного МЭМС-акселерометра угловых ускорений, выполненного в объеме кристалла кремния и в его поверхностных поликремниевых слоях, интегрированный в едином кристалле с КМОП СБИС обработки информации и управления

обеспечивает точность измерения в условиях значительного уровня шума, вибраций и жестких механических воздействий), удерживаемой в пространстве на эластичных амортизаторах и соединенной с электронной схемой тонкой алюминиевой или золотой проволокой. В акселерометре использован известный принцип емкостного преобразования, при котором емкость между кремниевой пластиной (подложкой) ЧЭ и расположенным под ней металлизированным электродом выполняет функцию чувствительной субстанции, реагирующей (т. е. изменяющей результатирующую емкость) на перемещение массы пластины под воздействием линейного ускорения.

Аналогичное конструктивное исполнение имеет двухкристальный МЭМС-акселерометр для подушки безопасности автомобиля, размещенный в герметичном 16-выводном полимерном корпусе (см. рис. 3 на второй стороне обложки). Отчетливо видна система подвески элемента ЧЭ на эластичных амортизаторах. Рабочее тело ЧЭ получено методом низкотемпературного спекания кремниевой и стеклянной подложек.

На рис. 4 представлен внешний вид ЧЭ СБИС МЭМС-акселерометра угловых ускорений, который выполнен в приповерхностном слое поликремния и используется в электронных системах блокировок и торможения автомобиля. Конструкция кремниевого ЧЭ включает кольцевую вибрирующую структуру, изготовленную методом гальванопластики (LIGA-технология). Исходная полупроводниковая структура для изготовления датчика получается путем спекания в вакууме кремниевых подложек. Режим вакуума обеспечивает добротность собственного резонансного контура ЧЭ датчика $Q > 1000$.

Процесс термокомпрессионной сварки (спекания) включает: прецизионную обработку поверхности, контакт, спекание.

Прецизионная обработка поверхности кремниевых пластин (после резки слитков) и, например, пирекса (боросиликатного стекла), может

включать полный набор известных операций многократной шлифовки (механической), полировки (механической и химической), органической очистки поверхности, отмычки и т. п., что обеспечивает не только удаление механических дефектов, устранение физически нарушенных слоев, загрязнений, но и параллельность плоскостей (доля микрометра на сантиметр длины), требуемую толщину пластин.

Необходимость операции прецизионной обработки подтверждается тем, что в МЭМС-структуратах кластер дефектности (частица, кратер) в 1 мкм можно сравнивать с наличием неравномерности поверхности $\varnothing 10$ мм на пластине $\varnothing 200$ мм или, другой сравнительный пример, — неравномерность поверхности 0,5 мм может быть сопоставима с наличием дефекта порядка 5 мкм на поверхности пластины $\varnothing 100$ мм.

Как только требуемые чистота и параллельность поверхности пластин достигнуты, проводится их термокомпрессия (плотный контакт и спекание).

В современном производстве МЭМС используют несколько методов компрессионной сварки (спекания) пластин: анодный, прямой или с промежуточным слоем. В последнем случае различают спекание через эвтектику и низкотемпературное стекло. В таблице представлены некоторые сравнительные характеристики указанных методов

Анодная термокомпрессия (anodic bonding) представляет собой процесс взаимной приповерхностной миграции частиц из пластин кремния и пирекса (боросиликатное стекло с 3,5 %-ным содержанием окиси натрия Na_2O) под воздействием приложенного напряжения и внешнего механического давления (рис. 5).

Приложенный высокий отрицательный потенциал вызывает миграцию положительных ионов Na^+ к электроду и их нейтрализацию. Перемещение ионов металла образует область электрического заряда на границе раздела "кремний—пирекс", который вызывает сильное электростатическое притяжение пластин по всей площади. Нагрев об-

Типовые характеристики методов термокомпрессионной сварки (спекания) при производстве МЭМС

| Метод термо-компрессии | Режимы | | | | | | |
|------------------------|-----------------|--------------|----------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Температура, °C | Давление, Па | Напряжение, кВ | Поверхностная неоднородность, нм | Прецизионный зазор | Герметичность спая | Вакуум, мм рт. ст. |
| Анодный | 300...500 | — | 0,1...1 | 20 | Есть | Есть | 10^{-5} |
| Прямой | 1000 | — | — | 0,5 | Есть | Есть | 10^{-3} |
| С промежуточным слоем | 400...500 | 10^5 | — | — | Нет | Есть | 10 |

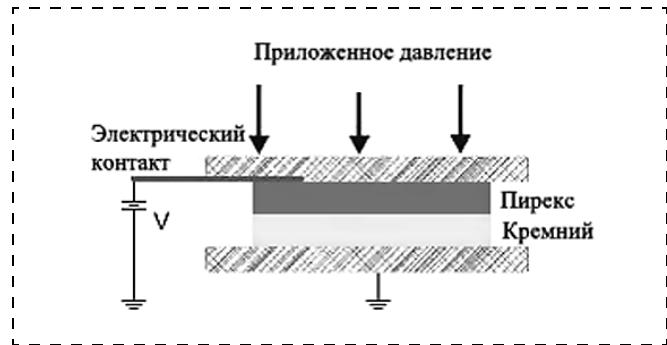


Рис. 5. Процесс анодного спекания пластин кремния и пирекса

ласти перехода до температуры 500 °C усиливает процесс миграции ионов, создавая условия для еще большего взаимного притяжения пластин. Кроме того, под воздействием сильного электрического поля ионы кислорода освобождаются из пирекса и мигрируют в область раздела "кремний—пирекс", окисление кремния приводит к формированию слоя SiO_2 и завершению процесса термо-компрессии пластин.

Прямой метод термокомпрессии (direct wafer — DWB) предполагает спекание двух предварительно обработанных и плотно соединенных кремниевых пластин. Одна из них имеет гидрофобную, а другая гидрофильтрующую поверхность, что обеспечивает хороший контакт перед высокотемпературным отжигом. Гидрофобная поверхность подвергается предварительной высокочастотной обработке, что упорядочивает ее структуру и обеспечивает улучшение параметров притяжения и контакта пластин. Гидрофильтрующая поверхность другой пластины проходит стандартную операцию очистки и обработки поверхности непосредственно перед контактом.

Присутствие гидроксильных радикалов на зеркально отполированной кремниевой поверхности обеспечивает хорошее начальное схватывание пластин после контакта. Оно усиливается дополнительным прижимным воздействием в средней точ-

ке одной из пластин, чтобы создать начальную точку контакта в момент, когда механические распорки обеспечивают еще отсутствие физического контакта между пластинами (рис. 6). Удаление боковых механических распорок (рис. 7) вызывает "волну схватывания пластин", которая распространяется от их середины к периферии со скоростью, определяемой вязкостью и давлением окружающей среды. Жесткое механическое схватывание кремниевых пластин после удаления распорок важно и для полного выдавливания воздушных прослоек между ними.

Последующее нагревание обезвоживает поверхность и вызывает к активности ряд новых процессов. Гидроксильные группы формируют водные молекулы, которые, в свою очередь, вызывают окисление спекаемых поверхностей кремниевых пластин и образование слоя Si—O—Si. При температуре спекания > 1000 °C кислород внедряется в кристаллическую решетку, что обеспечивает создание границы раздела, неотличимой по физико-химическим свойствам от других составляющих единой кремниевой структуры.

На рис. 8 показана микротурбина газового двигателя, механическая структура которой получена путем спекания пяти кремниевых пластин (MIT, США), из которых средняя несет основную нагрузку. Относительно нее с двух сторон размещены по две дополнительных кремниевых пластины. Средняя часть механической конструкции включает множество каналов и сложную перфорацию, обеспечивающую требуемые механические, аэродинамические и метрологические характеристики конструкции.

Термокомпрессия с использованием промежуточного слоя предполагает нанесение на пластины непосредственно перед спеканием эвтектики или стекла. Важным технологическим моментом в этом случае становится контроль за равномерным поверхностным взаимодействием компонентов на его начальной стадии и при температуре плавления

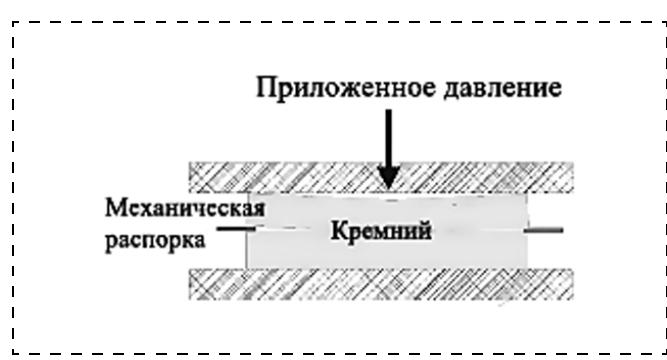


Рис. 6. Механическое давление в центр одной из кремниевых пластин позволяет повысить качество контакта между двумя спекаемыми пластинами (метод DWB)

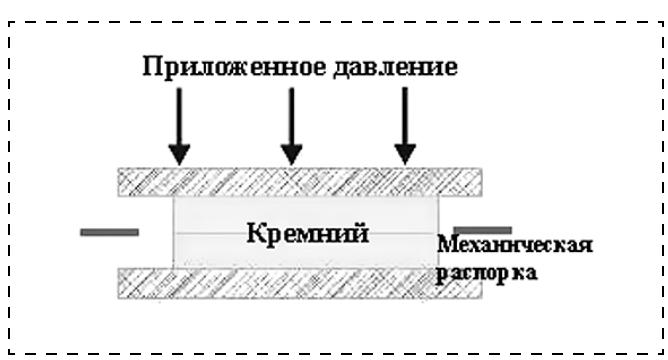


Рис. 7. Удаление механических распорок и обеспечение надежного контакта по всей поверхности кремниевых пластин

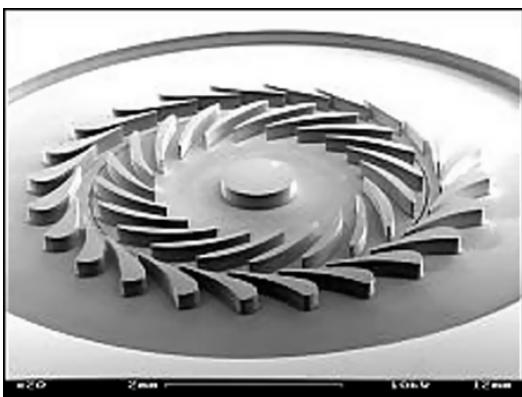


Рис. 8. Микротурбина, полученная прямым методом термокомпрессии (метод DWB) пяти слоев кремниевых пластин

(363 °C при содержании в эвтектике 2,85 % — Si и 97,15 % — Au). Сплав формируется на границе раздела компонентов путем взаимного проникновения веществ и отвердевает после охлаждения.

Для обеспечения качественного спекания по всей поверхности кремниевых пластин проводится их предварительная подготовка — удаление окисных пленок, которые могут препятствовать распространению золота в кремний при формировании эвтектического слоя. После того, как золотосодержащая пленка (эвтектика) нанесена, непосредственно перед спеканием образованную поверхность обрабатывают ультрафиолетом, чтобы устранить органические примеси, ухудшающие качество поверхностного контакта.

Как и в случаях анодной и прямой термокомпрессии к кремниевым пластинам прикладывается внешнее давление и задается соответствующий температурный режим. Сравнительно низкая температура образования эвтектического слоя делает метод термокомпрессии с использованием промежуточного слоя привлекательным, однако, как и при анодном спекании, этого еще недостаточно для абсолютной совместимости процесса с серийной технологией изготовления СБИС.

Когда в качестве промежуточного слоя используется стекло и применяется внешнее механическое давление на пластины для обеспечения их качественного контакта, при достижении рабочей температуры ~600 °C образуется глазуревая прослойка. Повышенная относительно эвтектики температура плавления усугубляет недостатки метода, когда его необходимо совмещать с технологическими процессами изготовления микросхем. Однако используемый материал и соответствующее приложение метода открывают возможности герметизации и корпусирования готового изделия.

На рис. 9 показана типовая конструкция емкостного акселерометра, полученная путем термо-

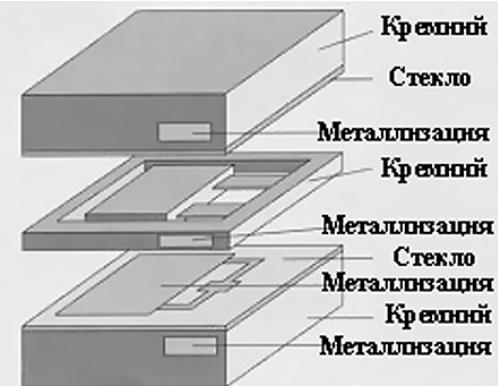


Рис. 9. Типовая конструкция акселерометра, изготовленного методом термокомпрессии с промежуточным слоем (стеклом)

компрессионной сварки трех кремниевых пластин методом спекания с промежуточным слоем.

Контроль качества спекания осуществляется инфракрасными методами, рентгеноскопией и сверхзвуковым зондированием. Метод инфракрасной спектроскопии, несмотря на его некоторые ограничения, связанные с длиной волны, прост и эффективен. Для его реализации требуется только источник инфракрасного излучения и цифровая камера с фильтрами видимого света.

Прочность спекания кремниевых пластин в МЭМС-конструкциях зависит от множества факторов (области применения, используемых материалов, технологических операций, методов спекания и т. п.), но в целом поддается численной оценке. В этом случае действие сил внешнего механического (прижимного) давления, поверхностного натяжения, поперечной деформации и расслоения должны учитываться при расчетах. Все они складываются в некое понятие "поверхностной энергии":

$$\lambda = [3/8(Eh^3S)/L^4],$$

где λ — удельная поверхностная энергия; E — модуль эластичности; h — толщина конструкции; S — площадь сечения конструкции; L — совокупная длина трещин.

Основным недостатком представленной модели удельной поверхностной энергии является ее существенная зависимость от точности определения (измерения) совокупной длины трещин.

Определенное влияние на показатели прочности МЭМС-конструкции оказывает ровность поверхностей спекаемых пластин. Технология выравнивания кремниевых пластин предполагает двухэтапное проведение операций. На первом этапе может использоваться, например, установка типа EV640 (фирма EV Group, США, рис. 10, а), которая позволяет проводить двухстороннее выравнивание



Рис. 10. Внешний вид установок EV640 (а) и EV560 (б) фирмы EV Group (США)

кремниевых пластин по принципу "одна к другой" и маскирование результатов выравнивания для учета при проведении последующих операций литографии.

После того, как поверхность пластин выровнена с погрешностью ± 1 мкм, они плотно прижимаются одна к другой напрямую или через соответствующий материал прослойки и загружаются в одну из вакуумных камер автоматизированной установки спекания (например, EV560 фирмы EV Group (США), рис. 10, б), контроль и управление режимами которой осуществляется компьютером. Установки спекания, подобные EV560, имеют несколько загрузочных камер и центральную автоматизированную систему для загрузки и разгрузки пар спекаемых пластин (робот-манипулятор). Каждая из загрузочных камер имеет независимое управление производственным процессом и поддержанием режимов в зависимости от выбранного метода спекания (температура ~ 550 °C, напряжение 2 кВ). Термокомпрессионная сила по результатам спекания может достигать 35 кН.

На рис. 11 (см. вторую сторону обложки) показана конфигурация мини-станции EV850 фирмы EV Group (США), объединившей в замкнутую кластерную систему все необходимое оборудование для реализации подготовки, проведения и контроля результатов технологического процесса термокомпрессионного сращивания кремниевых пластин в заданных конфигурациях.

После поступления кассеты с кремниевыми пластинами через один из портов загрузки 1 пла-

стины роботом-манипулятором переправляются в пост очистки 2, где они последовательно подвергаются обработке растворами гидроокиси аммония и перекиси водорода и ультразвуком. Затем пластины перемещаются в пост 3 парного выравнивания "одна к другой" с использованием оптических методов. В вакуумной камере 4 проводится предварительное плавление промежуточного слоя. В вакуумной камере 5 происходит окончательная операция термокомпрессионного спекания кремниевых пластин, а с помощью ИК-источника 6 получают контрольное отображение результатов спекания. Выпуск готовой продукции в виде МЭМС-структур осуществляется через порт выгрузки 7.

Рассмотренный технологический процесс получения трехмерных МЭМС-конструкций и использование для его реализации мини-станций типа EV850 открыли принципиально новые коммерческие возможности при организации массового и заказного производства акселерометров, датчиков давления, температуры и др. Переход на пластины со структурами "кремний на изоляторе" может распространить область применения методов и технологий термокомпрессионного спекания и на изготовление изделий МЭМС различного специального применения.

Литература

- Mirza A. R., Ayon A. A. Silicon wafer bonding: Key to MEMS High-Volume Manufacturing // Sensor. December 1998.

УДК 004.327.12+621.3.049.77

П. Г. Катыс, канд. техн. наук,
Г. П. Катыс, д-р техн. наук, академик РАЕН

МИКРОСИСТЕМНЫЕ ДИСПЛЕИ, ФОРМИРУЮЩИЕ ПРОЕКЦИОННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассмотрены принципы построения, основы функционирования и характеристики мехатронных проекционных дисплеев, основанных на использовании МОЭМС (микрооптикоэлектромеханических систем)

Введение

К настоящему времени сформировалась новая самостоятельная область техники — микромехатроника. Она быстро развивается и находит применение в различных областях информационной техники, в том числе в двумерных и трехмерных проекционных дисплеях [1–3]. Особые успехи достигнуты в направлении создания систем, которые в зарубежной литературе именуются как MOEMS (Micro-Optical-Electro-Mechanical System). Соответственно, в переводе на русский язык это название звучит как микрооптикоэлектромеханические системы, или МОЭМС. Этот класс систем широко используется для отображения и обработки визуальной информации. Разнообразные МОЭМС представляют собой высокоэффективные, многоканальные микрозеркальные сканеры и дефлекторы, использующие пьезоэлектрические, электростатические, электромагнитные и электротермические микроприводы (актуаторы). Они находят широкое применение в лазерных проекционных дисплеях, в пространственно-временных модуляторах света, в системах машинного видения и в других информационных системах. Об актуальности этого направления развития информационной техники можно судить по большому объему публикаций результатов выполненных исследований и разработок. Так, по этой теме в США в течение 2000–2003 гг. издано несколько обширных специализированных томов Proc. SPIE (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers) [4], которые в значительной степени послужили информационной основой данного обзора.

На основе использования МОЭМС созданы разнообразные лазерные проекционные дисплеи, предназначенные для воспроизведения двумерной и трехмерной визуальной информации как на больших экранах, так и в нашлемных микродисплеях. Преимуществом таких систем является высокая яркость и разрешающая способность изображения.

Пространственно-временные модуляторы света, созданные на основе матриц МОЭМС, применяются в различных системах обработки визуальной информации и в проекционных лазерных дисплеях. В таких дисплеях, в отличие от лазерных дисплеев, реализующих последовательное воспроизведение элементов изображения, осуществляется параллельное и одновременное воспроизведение всех элементов изображения, что позволило создать на основе этого принципа высокоэффективные одноканальные цветовые дисплеи с относительно простыми схемами. Такие дисплеи дают возможность воспроизводить на больших экранах цветные изображения такой высокой яркости и четкости, которые невозможно получить с помощью проекционных устройств, основанных на использовании других принципов действия.

Различные типы МОЭМС находят применение в системах машинного видения, а также для решения метрологических задач, когда требуется высокая точность контроля [5–7]. Кроме того, эти устройства могут применяться в производственных системах анализа и контроля продукции, действующих на основе обработки визуальной информации [7, 8]; они используются в оптоэлектронных системах контроля продукции в электронной промышленности, например, для автоматического контроля плат, чипов и т. д. [9].

На основе использования матриц МОЭМС создан класс оптоэлектронных многовариантных переключающих коммутирующих систем, которые в широком диапазоне могут изменять оптические связи между входным комплексом волоконно-оптических световодных каналов и соответствующим комплексом выходных световодных каналов. Такие устройства способны переключать и коммутировать большое число оптических каналов, причем они могут функционировать в ТВ-стандарте и осуществлять различные преобразования изображений [10–14]. Подобные многоканальные микрозеркальные устройства могут быть использованы для разных целей, и в том числе для кодирования и декодирования ТВ-изображений, передаваемых по каналам связи. Матричные структуры из большого числа зеркальных микродефлекторов, снабженных соответствующими микроактуаторами, применяются также в различных системах адаптивной оптики [15–17], в том числе в адаптивных зеркальных системах космических телескопов [18, 19].

Итак, МОЭМС различных типов сейчас эффективно используются в различных областях информационной техники. Широкое применение зеркальные МОЭМС получили также в проекционных системах отображения визуальной информации [20, 21]. Статья посвящена рассмотрению принципов действия, основ функционирования и

характеристик проекционных систем отображения визуальной информации, реализованных с использованием МОЭМС различных типов.

Проекционные дисплеи, выполненные с использованием МОЭМС

К настоящему времени разработаны разнообразные сканирующие устройства и системы, предназначенные для воспроизведения визуальной информации. Эти системы реализуются с использованием различных принципов действия: электронных, полупроводниковых и оптико-механических [1–3]. Созданы различные проекционные лазерные дисплеи, основанные на разнообразных принципах действия сканирующих устройств, предназначенных для покадрового отклонения лазерного луча. Для этой цели применяются как оптико-электрические, так и оптико-механические сканеры [22–24]. Оптико-механические сканеры в последнее время получили интенсивное развитие вследствие использования новейших достижений в области создания высокоеффективных микроприводов для двумерного отклонения микрозеркальных сканирующих элементов [25].

Новейшие производственные микро- и нанотехнологии позволяют создавать принципиально новые зеркальные оптико-механические микросканеры, обладающие пространственно-временными характеристиками, превосходящими соответствующие характеристики всех существующих сканеров других типов. Созданные на основе новых технологий микрозеркальные элементы обладают очень малыми геометрическими размерами и соответственно очень малой массой, благодаря чему они могут совершать колебания с высокой частотой. Требуемое движение с заданной частотой микрозеркал обеспечивают приводные микроэлементы (микроактуаторы). В качестве таких приводных микроэлементов используются пьезокерамические, электростатические и другие актуаторы. На такое микрозеркало, колеблющееся с соответствующими частотами относительно двух осей координат, направляется сфокусированный и промодулированный луч лазера. Отраженный от колеблющегося микрозеркала луч лазера перемещается по построчно-кадровой траектории и воспроизводит на экране изображение с требуемыми пространственно-временным разрешением и яркостью, которые могут значительно превышать соответствующие параметры дисплеев других типов. Для того чтобы воспроизводить на экране цветное изображение, используются три цветных лазера (красный, синий и зеленый). Модулированные излучения этих лазеров совмещаются и фокусируются на колеблющемся микрозеркале. Подобные проекционные лазерные системы применяются для проек-

ций синтезированных компьютером изображений на большие экраны, причем в этом случае может быть реализовано число строк в кадре порядка 10 000. Для воспроизведения изображений на очень больших экранах, на панорамных и сферических экранах используются одновременно несколько таких лазерных проекторов с микрозеркальными сканерами. При этом осуществляется необходимая незаметнаястыковка рядом воспроизводимых изображений.

Таким образом, можно отметить, что на основе применения новых информационных технологий — МОЭМС — создан новый класс оптико-механических сканеров, обладающих высокими информационными характеристиками. Такие зеркальные микросканеры имеют большие перспективы применения и по ряду показателей могут составить существенную конкуренцию для сканирующих устройств с другими принципами действия. Такие МОЭМС получили широкое применение в проекционных лазерных дисплеях, воспроизводящих как двумерные, так и трехмерные изображения [26–29].

На основе лазерных пьезоэлектрических микросканеров созданы различные проекционные стереодисплеи для воспроизведения трехмерных изображений. Такие стереодисплеи могут использоваться в различных тренажерных комплексах и являются многоракурсными многоканальными панорамными системами. В подобной системе с помощью комплекса стереоэкранов, расположенных вокруг оператора (или группы операторов), формируется трехмерное виртуальное пространство [26]. На каждом экране с помощью цветной проекционной лазерной стереосистемы, действующей на основе использования зеркальных микросканеров, воспроизводится последовательность изображений стереопар, имеющих высокое пространственное разрешение и изменяющихся с частотой 100–120 Гц. Оператор видит изображение сквозь светоклапанные очки, в которых переключение жидкокристаллических затворов осуществляется также с частотой 100–120 Гц. Таким образом можно устранить эффект мигания стереоизображений на экранах. Для одновременной смены изображений стереопар на всех экранах предусмотрена жесткая синхронизация действия стереоэкранов. Вследствие этого оператор, поворачивая голову или перемещаясь внутри пространства, ограниченного комплексом стереоэкранов, всегда будет воспринимать высококачественное трехмерное изображение виртуального пространства, отображаемого на экранах.

Как уже было отмечено, лазерные проекционные дисплеи, выполненные с применением высокоеффективных зеркальных микросканеров с пьезоэлектрическими актуаторами, обладают очень высоким

пространственно-временным разрешением воспроизводимых изображений. Подобное качество изображений недостижимо при использовании электронно-лучевых и матричных систем воспроизведения [27]. Такие микросканеры могут действовать с частотой сканирования до 100 кГц [28, 29].

Нашлемные микродисплеи, выполненные на основе МОЭМС

Перспективной областью применения лазерных зеркальных микросканеров с пьезоэлектрическими и электростатическими актуаторами являются различные нашлемные дисплеи и в том числе нашлемные стереодисплеи, используемые в системах виртуальной реальности [30, 31]. Весьма перспективно также применение лазерных микросканеров в так называемых ретинальных нашлемных стереодисплеях с воспроизведением визуальной информации непосредственно на сетчатке глаза [32, 34]. В этой системе используется миниатюрный полупроводниковый лазер, излучения которого безопасны для зрения. (Его мощность не превышает 7 мкВт.) Изображение создается сканирующим лазерным лучом на сетчатке глаза наблюдателя, в то время как в других нашлемных системах изображение формируется на экране, с которого оно затем воспринимается наблюдателем. В рассматриваемой системе видеосигнал подается на модулятор, который модулирует интенсивность лазерного луча, сканирующего непосредственно сетчатку глаза и формирующего на ней пятно подсвета требуемых размера, яркости и цвета. Построчное и покадровое перемещение светового пятна по сетчатке глаза осуществляется с помощью зеркального микросканера с пьезоприводом. В этом случае отсутствует такой эффект, как послесвечение люминофора, имеющий место в кинескопе или плоской матричной панели. Поэтому на поверхности сетчатки не создается полного изображения, как на экране обычного дисплея. Зеркальный микросканер перемещает сканирующий луч лазера по сетчатке построчно — точка за точкой. При этом образ каждой точки (ее яркость и цветность) последовательно поступают в зрительный центр мозга. Так формируется полная картина изображения. Для формирования полноцветного изображения используются три лазера с синим, красным и зеленым излучениями с последующим совмещением их в один луч.

В нашлемной стереосистеме этого типа используются два зеркальных микросканера — отдельно для левого и правого глаза. Это позволяет наблюдателю видеть полноцветное объемное изображение. Различие в ракурсах двух изображений стереопары, проецируемых микросканерами, обеспечивает естественное трехмерное стереовидение. В системе

достигается высокая разрешающая способность. При этом разрешение приближается к тому, которое человек способен различить, и создается высокая яркость формируемого изображения. Реализуемые в этой схеме цветовые градации лучше, чем у стандартных цветных мониторов. В результате в данной системе создается высокая реалистичность воспринимаемого цветного объемного изображения [32]. В ряде работ, например [33, 34], исследованы преимущества использования таких ретинальных микросканеров в нашлемных микродисплеях по сравнению со сканерами других типов. Основными преимуществами таких систем являются существенное упрощение оптической схемы нашлемного микродисплея и высокое пространственное разрешение.

В рассмотренных классах проекционных лазерных дисплеев как экранных, так и нашлемных (двумерных или трехмерных), используются МОЭМС разных типов, в том числе зеркальные резонансные микросканеры [35]. В последнее время разработаны также различные новые тонкопленочные микрозеркальные сканеры, предназначенные для лазерных дисплеев [36], и оригинальные асимметричные силиконовые микрозеркальные сканеры [37]. Реализованы различные двумерные микросканаторы с пьезоэлектрическим виброприводом сканирующего микрозеркала [38, 39], а также с электростатическим микроприводом, в котором используются отклоняющие электроды различной формы [40]. Микросканеры этого типа с размером квадратного зеркала $0,5 \times 0,5$ мм могут реализовать частоту сканирования 10 кГц [41—43]. Существуют микрозеркальные сканаторы с торсионным электростатическим рычажным микроприводом, которые могут перемещать сканирующие зеркала с частотой 17 кГц при максимальном угловом отклонении зеркала, равном 5° [44, 45]. С использованием подобных микросканеров создано несколько типов высокоинформационных проекционных лазерных дисплеев [46—50].

Созданы также микрозеркальные сканеры с электромагнитным микроприводом, реализованные с использованием силиконовых микрозеркал, постоянных магнитов и жестких магнитных пленок [51—53]. Отдельный класс составляют разнообразные электротермические микросканеры с зеркальными микроэлементами различной формы и низковольтными электротермическими виброприводами [54, 55]. Такие устройства обладают широкими функциональными возможностями и высокими точностными характеристиками, но их динамические характеристики ниже, чем у микросканеров других типов — пьезоэлектрических, электростатических и электромагнитных [56].

Пространственно-временные модуляторы света, основанные на МОЭМС

Отдельный класс информационных устройств, выполненных на основе МОЭМС и предназначенных для использования в системах обработки и представления визуальной информации, составляют пространственно-временные модуляторы света (ПВМС), называемые также управляемыми или динамическими транспарантами. После того как световой поток отражается от такого модулятора (или проходит через него), характеристики светового потока уже не будут одинаковыми по всему сечению. При этом пространственные и временные изменения светового потока определяются состоянием модулирующей среды. Под модулирующей средой можно понимать, например, зеркальную поверхность с управляемыми коэффициентами отражения. Под влиянием внешнего распределенного воздействия изменяются оптические показатели ПВМС, что позволяет модулировать световой поток пространственно распределенной по сечению информацией, которая также изменяется во времени. Пространственно-временная модуляция светового потока происходит в результате его взаимодействия с рабочей модулирующей средой ПВМС. При этом могут изменяться амплитуда, фаза, плоскость поляризации и направление распространения волны. Возможности модуляции тех или иных показателей светового потока зависят от принципа действия ПВМС, материала его рабочей среды, используемого способа его воздействия на световой поток, а также от характеристик модулируемого потока света. ПВМС могут применяться для управления когерентным светом с заданными длиной волны и направлением поляризации, а также естественным белым светом или светом другого спектрального состава. В настоящее время ПВМС находят применение в основном в системах когерентной обработки информации и в проекционных дисплеях.

Существует класс ПВМС, управляемых с помощью сканирующего электронного луча [57]. Но необходимо отметить, что основным недостатком электронно-лучевых ПВМС считается то, что они являются вакуумными системами. По этой причине они уступают по целому ряду параметров твердотельным ПВМС, основанным на использовании МОЭМС. Таким образом, ПВМС, выполненные на основе микрозеркальных элементов с использованием пьезоэлектрических и электростатических микроприводов, представляют значительный интерес для использования в проекционных дисплеях. В таких системах немодулированный колимированный пучок света направляется на ПВМС, состоящий из матрицы индивидуально управляемых зеркальных микроэлементов. При этом отражен-

ный световой поток становится пространственно модулированным по сечению и может быть направлен на экран, на котором будет сформировано соответствующее изображение [58, 59].

В настоящее время в США фирмой *Picture Texas Instrument* на основе микрозеркального ПВМС, состоящего из матрицы МОЭМС с цифровым управлением, создана оригинальная схема одноканального цветного проекционного дисплея [60]. В этой схеме на микрозеркальном ПВМС последовательно во времени воспроизводятся три кадра красной, синей и зеленой составляющих полноцветного изображения. На эти три кадра, сформированные на ПВМС, последовательно проецируются три цветовых потока: соответственно красный, синий и зеленый. Отраженные от ПВМС эти световые потоки, уже промодулированные по яркости, поступают на экран и воспроизводят высококачественные цветовые изображения ТВ-стандарта. Для формирования раздельных цветовых потоков красного, синего и зеленого подсвечивающих излучений использован вращающийся цветовой коммутатор с соответствующими светофильтрами. Цветовой коммутатор расположен перед источником подсвечивающих излучений и при вращении формирует последовательность световых потоков красной, синей и зеленой составляющих цветового кадра. Создаваемое в рассмотренной схеме цветовое изображение обладает высокой яркостью и пространственным разрешением [60].

На основе рассмотренной выше схемы может быть создан также цветной стереодисплей. Для этого на микрозеркальном ПВМС необходимо последовательно и попеременно (с частотой 100–120 Гц) воспроизводить левые и правые изображения стереопары. При этом у наблюдателя должны быть жидкокристаллические светоклапанные очки, в которых переключение левого и правого светозатворов происходит также с частотой 100–120 Гц, с соответствующей синхронизацией воспроизведения левого и правого изображений стереопары.

Разработан достаточно многочисленный класс ПВМС, применяемых в проекционных дисплеях, в которых используются МОЭМС разных типов, составляющих регулярную матричную структуру [61, 62]. Такие ПВМС могут быть использованы для воспроизведения высококачественных двухмерных и трехмерных изображений различными проекционными дисплеями, в том числе панорамными проекционными дисплеями [63]. Существуют матричные структуры ПВМС, в которых используются микроячейки, выполненные в виде подвижных жидких зеркал, функционирующих на основе CMOS-процесса (CMOS — Complementary—Metal—Oxide—Silicon) [64], а также на

основе деформируемых масляных пленок с электромеханическим воздействием и другие типы ПВМС [65–68].

* * *

В заключение необходимо отметить, что разработанные в последнее время разнообразные МОЭМС дают возможность создавать различные типы высокоинформационных экранных и нашлемных дисплеев как двумерных, так и трехмерных. Такие дисплеи обладают высокими характеристиками — пространственно-временным разрешением и яркостью формируемых изображений по отношению к дисплеям других типов.

Список литературы

1. Катыс Г. П. Автоматическое сканирование. М.: Машиностроение. 1979. 517 с.
2. Катыс Г. П., Катыс П. Г. Компьютерный анализ двумерных изображений // Информационные технологии. 1999. № 12. С. 28–44.
3. Chiu C. L. T., Yang K. H. Projection displays // Proc. SPIE. 1998. V. 3560. P. 13–24.
4. а) MOEMS technologies and applications. SPIE PRESS. 2000. Vol. PM85. 516 p.; б) MOEMS. Proc. SPIE. 2000. Vol. 4075. 766 p.; в) MOEMS and miniaturized systems. Proc. SPIE. 2000. Vol. 4178. 420 p.; г) Optomechatonic systems. Proc. SPIE. 2001. Vol. 4190. 530 p.; д) MOEMS and miniaturized systems III. Proc. SPIE. 2003. Vol. 4983. 406 p.; е) MOEMS and projection display. Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. 508 p.
5. Conner R. MEMS/MOEMS — Metrology and Machine visions // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4178. P. 232–245.
6. Madanagopal K., Tien N. System design for micropositioning and sensing of micro-electromechanical actuators // Proc. IEEE Instrumentation and measurement technology Conf. 2000. P. 1204–1207.
7. Motamedi E. Micro-Optics-Micromechanics and laser scanning and shaping // Proc. SPIE. 1995. Vol. 2383. P. 216–224.
8. Dickey F. M. et al. Optical method for micromachine monitoring and feedback // Sensors and actuators. A. Physical. 1999. Vol. 78. P. 220–235.
9. Dawson J. M. et al. MEMS feedback control using through-wafer optical device monitoring // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4178. P. 221–231.
10. Dager D. J. et al. Out-of-plane rotary micromirrors for reconfigurable photonic applications // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4983. P. 114–121.
11. Castracane J. et al. MOEMS device design, development and integration for interconnect applications // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4983. P. 102–108.
12. Kemme S. A. et al. Optical system properties of a reconfigurable MEMS interconnect // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4983. P. 94–101.
13. Juneau T. et al. Single-chip 1 × 84 MEMS array for optical telecommunication applications // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4983. P. 53–64.
14. Wang Z. F. et al. Development of 1 × 4 micro optical switch based on SOI vertical micromirror technology // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4983. P. 109–113.
15. Kurczynski P. et al. Electrostatically actuated membrane mirrors for adaptive optics // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4983. P. 305–313.
16. Krulevitch P. et al. MOEMS spatial light modulator development of the center for adaptive optics // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 172–179.
17. Schwarz W. et al. A micromachined deformable mirror for adaptive optics // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 230–241.
18. De Gaspari J. Micromirrors evaluated for space telescope // Mechanical Engineering magazine. 2000. Vol. 122. N 2. P. 30–31.
19. Garsia E. J., Nichols A. Silicon micromirrors for the next generation space telescope // American Astronomical Society Meeting. 2000. Vol. 196. P. 2304–2312.
20. Miles M. W. Interferometric modulation: MOEMS as an enabling technology for high-performance reflective displays // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 131–139.
21. Picard F. et al. Flexible micromirror linear array for high resolution projection display // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 45–55.
22. Yasseen A. et al. High-aspect ratio rotary polygon micromotor scanners // Proc. IEEE, Solid state sensors and actuators Workshops. 1998. P. 75–78.
23. Deter C., Kraenert J. High resolution scanning laser projection display with diode pumped solid state lasers // Proc. SPIE. 2000. Vol. 3964. P. 175–184.
24. Miesak E. Compact video projection display utilizing RGB lasers // Proc. SPIE. 2000. Vol. 3964. P. 152–157.
25. Najafi K. Micropackaging technologies for integrated microsystems: applications to MEMS and MOEMS // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 1–13.
26. Бушанский Ф. Р. Техника виртуальной реальности в Японии // Техника кино и телевидения. 1999. № 7. С. 62–63.
27. Mc Intyre T. R. et al. Advantages of scanned beam MOEMS approach to microdisplay and related application // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4178. P. 158–167.
28. Dudley D. et al. Emerging digital micromirror device application // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 14–25.
29. Starkweather G. K. IMOS — a new MEMS — optics display system // SID annual meeting. San Jose. June 2001.
30. Rolland J. P. Wide-angle, off-axis, see-through head-mounted display // Opt. Eng. 2000. Vol. 39. N 7. P. 1760–1767.
31. Biocca F., Rolland J. P. Virtual eyes can rear-range your body: adaptation to virtual eye location in see thru head mounted displays // Teleoperators Virtual Environ. 1998. Vol. 7. N 3. P. 262–277.
32. Freeman M. O. Miniature high-fidelity displays using a biaxial MEMS scanning mirror // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 56–62.
33. Orey H. et al. MEMS raster correction scanner for SXGA resolution retinal scanning display // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 106–114.
34. Jan J. et al. Magnetic actuation for MEMS scanner for retinal scanning displays // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 115–120.
35. Wolter A. et al. Improved layout for a resonant 2D micro scanning mirror with low operation voltages // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 72–82.
36. Kim S. G., Hwang K. H. Thin-film micromirror array for information display system // Proc. of Euro Display'99, Berlin. 1999.
37. Vangbo S. et al. Low cost micromachined mirrors for display systems // J. Micromech. Microeng. 1999. Vol. 9. P. 85–88.
38. Wang Q. M. et al. Nonlinear piezoelectric behavior of ceramic bending mode actuator under strong electric fields // J. Appl. Phys. 1999. Vol. 86. N 6. P. 3352–3360.
39. Ejimoto K. et al. Tetramorph, a novel optical scanner using four piezoelectric bimorphs // Opt. Eng. 2000. Vol. 39. N 11. P. 3025–3031.
40. Schenk H. et al. An electrostatically excited 2D-micro-scanning-mirror with an inplane configuration of the driving electrodes // IEEE MEMS. 2000. 13 th. Int. microelectromechanical systems. Conf Japan (2000). P. 473–478.
41. Schenk H. et al. Design and modeling of large deflection micromechanical 1D and 2D scanning mirrors // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4178. P. 116–125.
42. Broun M., Mansouri G. Nonlinear dynamics and control of a dualcapacitively driven torsional MEMS scanning mirror // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 63–71.
43. Yen J. L. et al. Integrated polysilicon and drie bulk silicon micromachining for an electrostatic torsional actuator // J. Microelectromech. Syst. 1999. Vol. 8. P. 456–465.

44. Lin H. Y. The improvement of micro-torsional-mirror for high frequency scanning // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4178. P. 98–105.

45. Kiang M. H. et al. Electrostatic combdrive-actuated micro-mirrors for laser-beam scanning and positioning // J. of microelectromechanical systems. 1998. Vol. 7. N 1. P. 27–37.

46. Conant R. A. et al. A raster-scanning full motion video display using polysilicon micromachined mirrors // Transducers'99, Japan. 1999. P. 376–379.

47. Hagelin P. M., Solgaard O. Optical raster-scanning displays based on surface-micromachined polysilicon mirror // IEEE Selected topics in quantum electronics. 1999. Vol. 5. N 1. P. 67–74.

48. Garsia E. J. Pivoting micromirror designs for large orientation angles // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4178. P. 126–136.

49. Garsia E. J. Micro-flex mirror and instability actuation technique // Proc. IEEE Intern. Workshop on MEMS. 1998. P. 479–485.

50. Muller R. S., Lau K. Y. Surface-micromachined microoptical elements and systems // Proc. IEEE. 1998. Vol. 86. N 8. P. 1705–1720.

51. Miyajima H. et al. Adurable, shock-resistant electromagnetic optical scanner with polyamide-based hinges // IEEE Journal of micro-electro-mechanical systems. 2001. Vol. 10. N 3. P. 418–424.

52. Cho H. J., Ahn C. H. A novel bi-directional magnetic microactuator using electroplated permanent magnet arrays with vertical anisotropy // Proc. 2000. IEEE MEMS Conf., Japan. 2000. P. 686–691.

53. Miyajima H. MEMS electromagnetic optical scanner // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 95–105.

54. Pia M., Tien N. Low voltage electrothermal vibromotor for silicon optical bench application // Sens. Actuators. 2000. Vol. A83. P. 237–243.

55. Tien N. C. et al. MEMS actuators for silicon micro-optical elements // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4178. P. 256–269.

56. Schweizer S. et al. Thermally actuated microp projector for optical display applications // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4178. P. 165–174.

57. Катыс Г. П., Осадчий В. И., Осадчий А. И. Электроннолучевые информационные устройства. Киев: Наукова думка. 1987. 302 с.

58. Tee C. A. et al. Binary phase modulation using electrically addressed transmissive and silicon backplane spatial light modulators // Opt. Eng. 2000. Vol. 39. N 9. P. 2527–2534.

59. Tee C. A. et al. Phase modulation using the silicon backplane spatial light modulator and transmissive glass // Proc. SPIE. 1999. Vol. 3805. P. 19–29.

60. Huang P. S. et al. Digital fringe projection technique for high-speed 3D shape measurement // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4222. P. 54–60.

61. Kück H. et al. Devormable micromirror devices as phase modulating high resolution light valves // Sensors and actuators. 1996. A54. P. 536–541.

62. Moseley S. H. et al. Status of the development of a 128×128 microshutter array // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4178. P. 51–58.

63. Pizzi M. et al. Electrostatic microshutter-micromirror arrays for light modulation systems // Proc. SPIE. 1999. Vol. 3878.

64. Wolter A. et al. Fabrication of the moving liquid mirror spatial light modulator in a standard CMOS-process // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4178. P. 246–254.

65. Sakarya S. et al. Technological approaches for fabrication of elastomer based spatial light modulator // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 279–285.

66. Becker T. et al. MEMS spatial light modulator with integrated electronics // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 193–203.

67. Dimas C. et al. Large-scale polysilicon surface micro-machined spacial light modulator // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 204–210.

68. Jang R. et al. Design and fabrication of microlens and spatial filter array by self-alignment // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4985. P. 26–36.

УДК 621.382.213

М. И. Горлов, д-р техн. наук,
А. В. Андреев, канд. техн. наук,
Воронежский государственный технический
университет

ВСТРОЕННЫЕ ДАТЧИКИ ВЛАЖНОСТИ В ПОДКОРПУСНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Описана методика контроля влажности в подкорпусном объеме интегральных схем с помощью встроенных датчиков влажности. Показана необходимость контроля содержания влаги для повышения качества и надежности выпускаемой продукции. Предложена конструкция датчика точки росы поверхностно конденсационного типа.

Введение

Пары воды, адсорбированные на поверхности полупроводникового кристалла, либо непосредственно участвуют в деградационных процессах, либо косвенно способствуют развитию разного рода механизмов отказов интегральных схем (ИС). Отказы, связанные с влиянием влаги, составляют значительную часть от общего их числа, а именно для ИС в металлокерамических корпусах — до 60–80 % [1, 2].

Известно, что количество влаги внутри корпуса по разному влияет на коррозию алюминиевой металлизации в зависимости от конструкции ИС. Например, для ИС, изготовленных по КМОП-технологии в корпусах 401.14-5 с посадкой кристалла на эвтектику кремний—золото, существует очевидная зависимость между содержанием влаги внутри корпуса и коррозией алюминиевой металлизации, причем пороговое значение влажности, выше которого возможна коррозия, составляет $10 \text{ г}/\text{м}^3$ [3].

Для ИС другой конструкции эта зависимость может быть иной. Поэтому очевидным стало требование заказчика к технологическому процессу изготовления ИС, чтобы содержание паров воды в подкорпусном объеме при температуре 100°C было не более 0,5 объемного процента [4], что идентично предельно допустимому содержанию паров воды, нормированному военным стандартом США MIL-STD-883B, равному 5000 млн^{-1} [1].

Общие принципы контроля

В отечественном отраслевом стандарте контроль содержания паров воды внутри корпуса ИС рекомендуется проводить одним из следующих методов [5]: с помощью масс-спектрометра; с помощью детектора влаги в газе-носителе или путем измерения электрической проводимости откалиброванного элемента, вмонтированного в корпус.

Например, метод измерений содержания паров воды в газовой среде изделия масс-спектрометром, который должен обладать способностью воспроизвести обнаруживать определенное содержание паров воды в корпусе с соотношением сигнал/шум 20/1, т. е. при предельном содержании паров воды 5000 млн^{-1} в корпусе объемом $0,01 \text{ см}^3$ масс-спектрометр должен чувствовать минимальный предел содержания влаги 250 млн^{-1} .

После установки ИС в камеру ее объем вакуумируется и подвергается отжигу при температуре $100 \pm 5^\circ\text{C}$.

Отжиг должен проводиться до тех пор, пока уровень фонового давления не начнет препятствовать чувствительности и точности заданного измерения. После вакуумирования и отжига крышку корпуса ИС нужно просверлить (или пробить) и с помощью масс-спектрометра измерить содержание паров воды выпущенных газов как процентное содержание на единицу объема или частей на миллион от объема (млн^{-1}) общего газового содержания.

Как видим, главным недостатком описанного выше и подобных методов является необходимость проведения дорогостоящих и разрушающих лабораторных исследований, поэтому в настоящее время большое внимание уделяется альтернативным методам контроля, одним из которых является использование специальных элементов, встроенных в корпус ИС.

В качестве такого элемента рекомендуются датчики поверхностно-конденсационного типа (датчики точки росы) и сорбционные; общее название их — микроэлектронные датчики влажности (МЭДВ).

Требования к МЭДВ

МЭДВ встраивается в корпус ИС вместо или одновременно (если корпус большой) с кристаллом схемы. Такие датчики, как правило, должны по размерам соответствовать кристаллам ИС, допускать монтаж в корпус обычными для технологии сборки ИС способами, сохранять работоспособность после различных воздействий в процессе герметизации корпусов и последующих испытаний, включая электротермотренировку в течение 168 или 240 ч, термоциклирование в диапазоне температур $-60...+150^\circ\text{C}$, длительное хранение (500 или 1000 ч) при температуре $+150^\circ\text{C}$. Датчики должны обладать стабильными метрологическими характеристиками, малым гистерезисом изотермы влаги.

Совокупности указанных требований в полном объеме удовлетворяют датчики поверхностно-конденсационного типа, или датчики точки росы.

Конструкция датчика точки росы

Из многочисленных конструкций таких датчиков авторами был выбран за простоту конструкции и универсальность датчик емкостного типа. Этот тип датчика совместим практически с любым технологи-

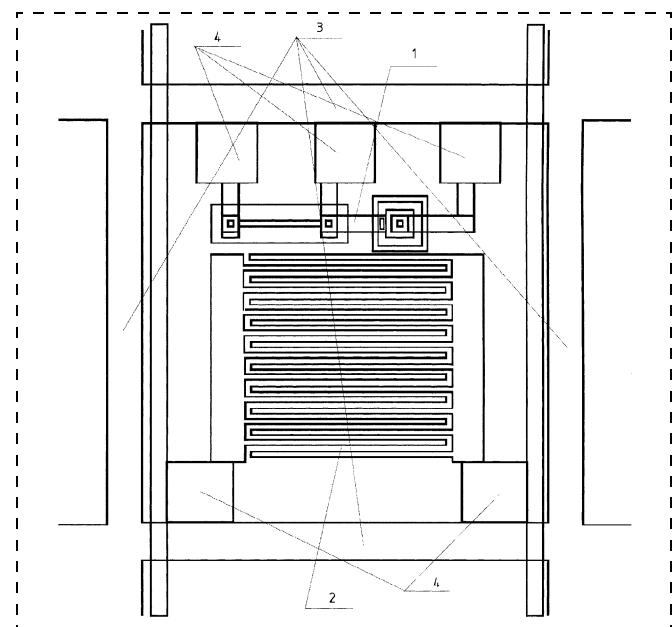


Рис. 1. Топология датчика точки росы:

1 — термодатчики; 2 — линейки конденсаторов; 3 — линии для скрайбирования; 4 — контактные площадки

ческим процессом производства ИС и при этом имеет неплохие метрологические характеристики [1].

Сконструированный авторами датчик этого типа представляет собой кристалл кремния размером $1 \times 1 \text{ мм}$ с размещенным на нем конденсатором, составленным из двух гребенок металлизации с зазором в 10 мкм (рис. 1, где условно показана его топология). Кроме того, на кристалле размещен сдвоенный термодатчик, позволяющий контролировать температуру в процессе измерений. Момент наступления точки росы соответствует излому на зависимости емкости датчика от температуры. Этот излом связан с изменением диэлектрической проницаемости воздушного промежутка вследствие конденсации влаги.

Использование сдвоенного термодатчика диодно-резистивного типа [6] позволяет повысить точность измерения температуры.

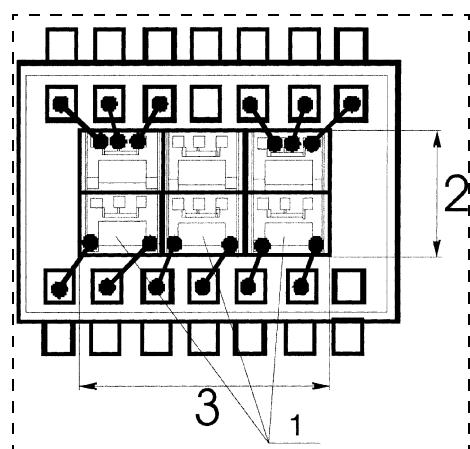


Рис. 2. Схема позиции датчика точки росы в корпусе типа 401.14.4 (размеры указаны в миллиметрах)

Конструкция датчика позволяет размещать последний в любом типе корпуса ИС. На рис. 2 показана посадка кристалла датчика размером 3×2 мм в корпус типа 401.14.4. Для этого типа корпуса вырезается кристалл, содержащий шесть отдельных датчиков. Параллельное соединение конденсаторов на кристалле вертикально расположенных датчиков позволяет повысить точность измерения влаги в подкорпусном объеме. На рис. 2, исходя из размеров корпуса, запараллелены три пары конденсаторов, что также позволяет повысить точность измерений. Дублирование термодатчиков на одном датчике в корпусе позволяет увеличить выход годных практически до 100 %.

* * *

Таким образом, в данной работе рассмотрена конструкция емкостного датчика точки росы, предназначенному для контроля влажности внутри корпуса ИС. Особая топология датчика допускает его

монтаж в любой тип корпуса ИС обычными методами. Кроме того, предусмотрен контроль температуры кристалла ИС в процессе измерений сдвоенным термодатчиком резистивно-диодного типа.

Список литературы

- Чернышев А. А., Крутоверцев С. А., Бутурлин А. И. Контроль влажности в корпусах интегральных схем // Зарубежная электронная техника. 1987. Вып. 2. С. 3–63.
- Уоллер Л. Контроль уровня влажности внутри корпуса БИС // Электроника, 1980. № 4. С. 12–13.
- Батюк Н. М., Миляевич И. В. Влияние влажности атмосферы внутри корпусов интегральных схем на коррозию алюминиевой металлизации // Электронная техника. Серия 8/6. 1992. Вып. 2–3. С. 37–38.
- ОСТ 11 20.9903—86. Микросхемы интегральные. Системы и методы операционного контроля в процессе производства.
- ОСТ 11 20.9903—86. Микросхемы интегральные. Часть 2. Испытания на воздействия климатических факторов и сред за-полнения.
- Астахов В. П., Гиндин В. В., Карпов В. В., Короневский И. М. Особенности нестабильности диодных термодатчиков на кремнии / Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах // Материалы докладов международного научн.-техн. семинара. М.: МЭИ. 2001. С. 241–247.

Конструирование и моделирование МСТ

УДК 621.315.592

**А. Б. Евлохин, канд. физ.-мат. наук,
И. Ю. Фадеева,**
Владимирский государственный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СКАНИРУЮЩЕЙ БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ СОБИРАЮЩЕЙ И ОБЛУЧАЮЩЕЙ КОНФИГУРАЦИЙ

Целью исследования является сравнение изображений одного и того же образца, полученных при численном моделировании процессов формирования изображений в сканирующем ближнеполевом оптическом микроскопе (СБОМ) двух конфигураций.

Теоретическая модель основана на формализме самосогласованных интегральных уравнений для электромагнитных полей в системе. Рассмотрены случаи, когда наноскопические объекты представляются в виде выступа и впадины на плоской поверхности диэлектрика. Результаты расчетов демонстрируют, что взаимодействие между зондом и образцом играет важную роль в определении характеристик полученных изображений.

Введение

Как известно сканирующая ближнеполевая оптическая микроскопия успешно применяется для

получения изображений разнообразных поверхностных структур со сверхволновым разрешением [1]. В настоящее время существуют несколько типов сканирующих ближнеполевых оптических микроскопов (СБОМ) [2, 3], отличающихся способами подвода и регистрации излучения.

В собирающей конфигурации наноскопический объект на некоторой поверхности облучается световой волной при условии ее полного внутреннего отражения от поверхности, т. е. с объектом взаимодействует только экспоненциально спадающая волна, прошедшая через поверхность. Рассеянный образцом свет собирается в ближней волновой зоне кончиком волоконной иглы, которая служит зондом микроскопа, и затем передается этим зондом к детектору, расположенному в дальней волновой зоне.

В облучающей конфигурации образец облучается светом из волоконно-оптической иглы и эта же игла служит зондом для сбора результирующего света и передачи его детектору. Часто интерпретация оптической информации, которая может быть получена в СБОМ, остается неоднозначной вследствие сложности протекающих процессов. Поэтому теоретическое изучение процессов формирования изображения в СБОМ является принципиально важным. Для этого в общем случае необходимо решать систему уравнений Максвелла для электро-

магнитных полей с учетом сложной геометрии граничных условий, что представляет весьма сложную математическую задачу.

В последнее время был развит ряд теоретических подходов для моделирования электромагнитных полей в СБОМ [2, 4–6]. В данной работе процесс формирования изображений в СБОМ обсуждается с теоретической точки зрения. Целью статьи является сравнение изображений одного и того же объекта, полученных на основе теоретических моделей для СБОМ двух конфигураций. Для моделирования электрических полей в системе мы используем метод интегральных уравнений (МИУ) [4], основанный на тензорной функции Грина, записанной в представлении реального пространства.

Данный подход позволяет избежать явного задания граничных условий для электромагнитных полей. Для определения тензорной функции Грина исследуемой системы мы используем незапаздывающее приближение. Зонд моделируется как прямоугольный диэлектрический объект, расположенный вблизи поверхности.

Описание физической модели

Схематическое изображение процессов сканирующей ближнеполевой оптической микроскопии наноразмерных объектов показано на рис. 1. Исследуемые объекты S и P в форме параллелепипедов с относительными диэлектрическими проницаемостями ϵ_S и ϵ_P расположены на поверхности и под поверхностью образца с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_1 .

В случае собирающей конфигурации (рис. 1, а) плоская монохроматическая электромагнитная волна падает со стороны образца на его поверхность под углом полного внутреннего отражения θ . Она создает экспоненциально спадающее (исчезающее) поле, которое взаимодействует с наноскопическими объектами, расположенными на поверхности. Если такие объекты находятся под поверхностью, то исчезающее поле на поверхности может быть искажено. Информация о состоянии данного поля собирается конечным прямоугольным объектом T с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_T . Данный объект располагается на некотором расстоянии от поверхности и моделирует зонд СБОМ. Объект T переизлучает вторичные электромагнитные волны в точку расположения детектора D в дальней волновой зоне.

Мы рассматриваем два типа поляризации падающей волны — ТМ-поляризацию и ТЕ-поляризацию. В первом случае вектор напряженности электрического поля в падающей волне параллелен плоскости падения, во втором случае — перпендикулярен.

В облучающей конфигурации СБОМ (рис. 1, б) прямоугольный объект T облучается плоской монохроматической электромагнитной волной, направленной в отрицательном направлении оси Z . В результате данный объект испускает вторичные волны, которые рассматриваются нами как излучение, взаимодействующее с исследуемыми наноскопическими объектами на поверхности и под поверхностью образца. Более того, этот же объект T выступает и в качестве зонда, регистрирующего оптический сигнал от образца и передающий его к точечному детектору D в дальней волновой зоне.

В обеих конфигурациях зонд может сканировать поверхность образца, меняя свое положение относительно объектов S и P , оставаясь при этом на одном и том же расстоянии от плоской поверхности. Такой режим сканирования принято называть режимом постоянной высоты зонда. Основной задачей расчетов является определение интенсивности электромагнитного поля в точке расположения детектора при условии сканирования зондом поверхности образца.

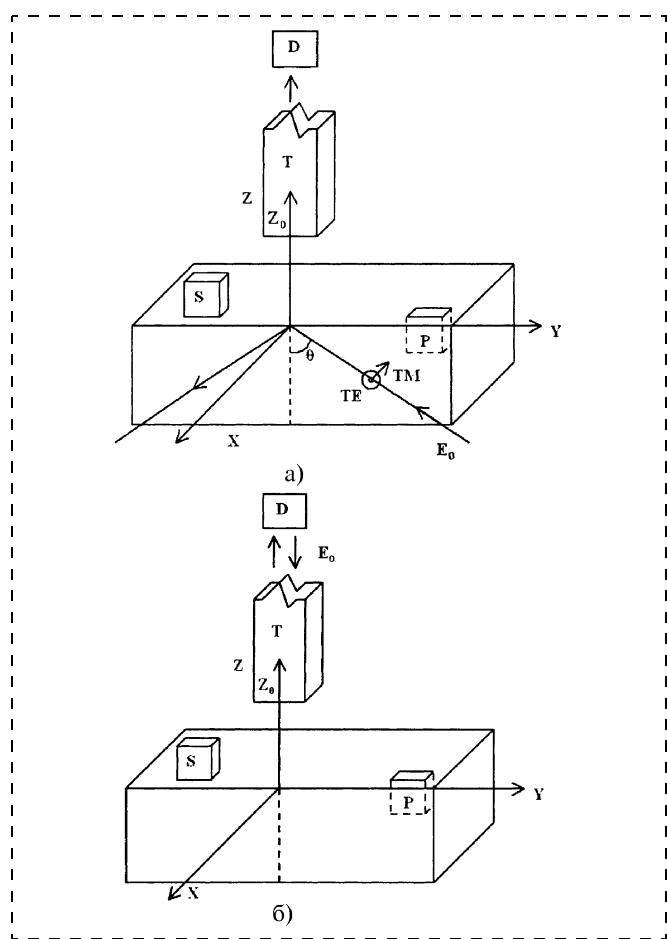


Рис. 1. Модели СБОМ:

а — собирающая конфигурация; б — облучающая конфигурация

В случае собирающей конфигурации соотношения между амплитудами падающей, отраженной и прошедшей волн определяются формулами Френеля [7]. Мы считаем, что свет имеет длину волны $\lambda = 633$ нм, область над образцом — вакуум ($\epsilon_2 = 1$), а зонд T и образец без объектов S и P имеют относительную диэлектрическую проницаемость, равную 2,25. Угол падения θ принимается равным $\pi/3$. Плоскость падения совпадает с плоскостью $Z-X$. Наноскопические объекты не имеют магнитных свойств, поэтому их отклик на внешнее поле определяется возникновением индуцированной электрической поляризации.

Система уравнений для электрического поля

Из системы уравнений Максвелла для физических систем, представленных на рис. 1, можно записать волновое уравнение для полного электрического поля, включающего поперечную и продольную составляющие (зависимость от времени предполагается гармонической $\exp(-i\omega t)$, где ω — угловая частота, и везде явно не выписывается):

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) - k_0^2 [\Theta(-z)(\epsilon_1 + \Delta\epsilon_P(\mathbf{r})) + \Theta(z) \times (\epsilon_2 + \Delta\epsilon(\mathbf{r}))] \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0, \quad (1)$$

где $\nabla \times$ — оператор ротора; $k_0 = \omega / \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ — волновое число в вакууме; μ_0 и ϵ_0 — магнитная и электрическая постоянные, соответственно; $\Theta(z)$ — ступенчатая функция Хевисайда;

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_P(\mathbf{r}) &= \begin{cases} \epsilon_P - \epsilon_1, & \mathbf{r} \in V_P; \\ 0, & \mathbf{r} \notin V_P; \end{cases} \\ \Delta\epsilon(\mathbf{r}) &= \begin{cases} \epsilon_S - \epsilon_2, & \mathbf{r} \in V_S; \\ \epsilon_T - \epsilon_2, & \mathbf{r} \in V_T; \\ 0, & \mathbf{r} \notin V_S \cup V_T. \end{cases} \end{aligned}$$

Здесь V_P и V_S — объемы объектов, расположенных под поверхностью образца и на ней, соответственно; V_T — объем, занимаемый зондом.

Величина в квадратных скобках уравнения (1) является относительной диэлектрической проницаемостью всей системы. Решение волнового уравнения (1) можно записать в интегральном виде, используя метод функции Грина [4]. Для этого перепишем уравнение (1) в виде

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) - k_0^2 [\Theta(-z)\epsilon_1 + \Theta(z)\epsilon_2] \mathbf{E}(\mathbf{r}) = i\omega \mathbf{j}(\mathbf{r}), \quad (2)$$

где мы ввели плотность электрического тока

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}) = -i\omega \epsilon_0 [\Theta(-z)\Delta\epsilon_P(\mathbf{r}) + \Theta(z)\Delta\epsilon(\mathbf{r})] \mathbf{E}(\mathbf{r}). \quad (3)$$

Решение уравнения (2) можно представить в виде

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + i\omega \mu_0 \int \vec{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \mathbf{j}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}', \quad (4)$$

где интегрирование ограничено областями V_P , V_S и V_T . Тензорная функция Грина $\vec{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$ для двух однородных полупространств с относительными диэлектрическими постоянными ϵ_1 и ϵ_2 и плоской границей, проходящей по плоскости $z = 0$, определяется уравнением

$$\nabla \times \nabla \times \vec{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) - k_0^2 [\Theta(-z)\epsilon_1 + \Theta(z)\epsilon_2] \times \times \vec{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \vec{U}, \quad (5)$$

где \vec{U} — единичный тензор. Величина $\mathbf{E}_0(\mathbf{r})$ является решением однородного уравнения

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) - k_0^2 [\Theta(-z)\epsilon_1 + \Theta(z)\epsilon_2] \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0. \quad (6)$$

Из уравнения (5) следует, что тензорная функция Грина двух полупространств имеет разный вид в зависимости от положений радиус-векторов \mathbf{r} и \mathbf{r}' относительно границы раздела. Поэтому запишем эту функцию следующим образом:

$$\begin{aligned} \vec{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) &= \\ &= \begin{cases} \vec{G}_{11}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega), \mathbf{r}, \mathbf{r}' \in \text{среде с } \epsilon_1, \\ \vec{G}_{12}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega), \mathbf{r} \in \text{среде с } \epsilon_1, \mathbf{r}' \in \text{среде с } \epsilon_2, \\ \vec{G}_{22}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega), \mathbf{r}, \mathbf{r}' \in \text{среде с } \epsilon_2, \\ \vec{G}_{21}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega), \mathbf{r} \in \text{среде с } \epsilon_2, \mathbf{r}' \in \text{среде с } \epsilon_1. \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

Заменяя плотность тока в уравнении (4) выражением (3) и используя обозначения из (7) для функции Грина, мы можем получить систему интегральных уравнений для определения электрического поля в зонде T и объектах S и P . Для случая СБОМ собирающей конфигурации

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) &= \mathbf{E}_1(\mathbf{r}) + k_0^2 \int_{V_P} \vec{G}_{11}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta\epsilon_P(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' + \\ &\quad + k_0^2 \int_{V_T} \vec{G}_{12}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta\epsilon_T(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' + \\ &\quad + k_0^2 \int_{V_S} \vec{G}_{12}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta\epsilon_S(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}', \quad (\mathbf{r} \in V_P), \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) &= \mathbf{E}_T(\mathbf{r}) + k_0^2 \int_{V_P} \vec{G}_{21}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta\epsilon_P(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' + \\ &\quad + k_0^2 \int_{V_T} \vec{G}_{22}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta\epsilon_T(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' + \\ &\quad + k_0^2 \int_{V_S} \vec{G}_{22}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta\epsilon_S(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}', \quad (\mathbf{r} \in V_T; V_S), \end{aligned}$$

где $\mathbf{E}_1(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_I(\mathbf{r}) + \mathbf{E}_R(\mathbf{r})$, т. е. сумма падающей и отраженной волн для случая, когда в системе от-

существуют объекты T , S и P ; $\mathbf{E}_T(\mathbf{r})$ — прошедшая волна. Для СБОМ облучающей конфигурации систему интегральных уравнений запишем следующим образом:

$$\begin{aligned}\mathbf{E}(\mathbf{r}) &= \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + k_0^2 \int_{V_P} \vec{G}_{22}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta \varepsilon_T(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' + \\ &+ k_0^2 \int_{V_T} \vec{G}_{22}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta \varepsilon_S(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' + \\ &+ k_0^2 \int_{V_S} \vec{G}_{21}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta \varepsilon_P(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}', \quad \mathbf{r} \in V_T, \\ \mathbf{E}(\mathbf{r}) &= k_0^2 \int_{V_P} \vec{G}_{22}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta \varepsilon_T(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' + \\ &+ k_0^2 \int_{V_T} \vec{G}_{22}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta \varepsilon_S(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' + \\ &+ k_0^2 \int_{V_S} \vec{G}_{21}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta \varepsilon_P(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}', \quad \mathbf{r} \in V_S, \\ \mathbf{E}(\mathbf{r}) &= k_0^2 \int_{V_P} \vec{G}_{12}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta \varepsilon_T(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' + \\ &+ k_0^2 \int_{V_T} \vec{G}_{12}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta \varepsilon_S(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' + \\ &+ k_0^2 \int_{V_S} \vec{G}_{11}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta \varepsilon_P(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}', \quad \mathbf{r} \in V_P, \quad (9)\end{aligned}$$

здесь мы учли тот факт, что внешнее поле $\mathbf{E}_0(\mathbf{r})$ непосредственно взаимодействует только с зондом T .

В рассматриваемой модели мы считаем, что зонд имеет относительно малый конечный размер порядка 100 нм. В реальной ситуации волоконно-оптическая игла, служащая зондом микроскопа, имеет протяженные размеры и соединяется с направляющим световодом. Включение в вычислительную процедуру всей иглы могло бы привести к колossalному увеличению времени машинного счета и чрезмерным требованиям к объемам компьютерной памяти.

Однако, учитывая специфику ближнеполевого взаимодействия между зондом и поверхностными электромагнитными волнами, где основной вклад происходит от исчезающих компонентов поля, мы ограничились учетом только малого кончика иглы (зонда), который непосредственно взаимодействует с этими компонентами поля.

Данный подход позволяет нам учесть главную специфику ближнеполевой микроскопии и оценить влияние зонда на распределение электромагнитных полей в ближней зоне вокруг образца. Во-первых, сигнал к детектору передается зондом, только малая часть которого взаимодействует с образцом в ближней волновой зоне, и поэтому этот сигнал пропорционален интенсивности такого взаимодействия. Во-вторых, на данном масштабе

длин существует дополнительный канал рассеяния электромагнитных волн индуцированными диполями зонда, что искажает информацию о свойствах образца.

Наша модель не включает в рассмотрение распространение излучения по волокну от зонда к детектору, но учитывая тот факт, что эти процессы зависят от поляризации излучения [8], мы рассчитываем интенсивность для каждого компонента электрического поля в точке детектора, расположенной в дальней волновой зоне.

Для того чтобы определить поле из систем (8) и (9), необходимо знать тензорную функцию Грина $\vec{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$ для системы. Для этого мы воспользуемся методом ее построения, рассмотренным в [9]. Он основан на приближении, которое не учитывает эффекты запаздывания и описывает влияние плоской поверхности на электрические свойства малого объекта как взаимодействие электрических диполей в объекте с их изображениями относительно поверхности.

Этот подход представляется вполне обоснованным, когда расстояние между диполями и поверхностью значительно меньше длины волны внешнего излучения, которое индуцирует диполи. Данное условие выполняется в рассматриваемой нами системе. Однако заметим, что выражения для величины $\vec{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$, предложенные в [9], включают некоторое запаздывание благодаря явной зависимости тензора Грина от длины волны внешнего излучения (см. ниже). В рамках описанного приближения тензорную функцию Грина можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\vec{G}_{ii}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) &= \vec{D}_i(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \frac{\exp(ik_i R)}{4\pi} + \\ &+ \frac{(-1)^{i+1} \varepsilon_1 + (-1)^i \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \vec{D}_i(\mathbf{r}, \mathbf{r}'_M) \cdot \vec{M} \frac{\exp(ik_i R_M)}{4\pi}; \\ \vec{G}_{ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) &= \frac{\exp(ik_i R)}{4\pi} \frac{2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \vec{D}_i(\mathbf{r}, \mathbf{r}'), \quad i \neq j; \quad (10)\end{aligned}$$

где $\mathbf{r} \neq \mathbf{r}'$; $\mathbf{r}'_M = (x', y', -z')$; $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$; $R_M = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'_M|$; $i = 1, 2$; $j = 1, 2$;

$$\begin{aligned}\vec{D}_i(\mathbf{r}, \mathbf{r}') &= \left(\frac{1}{R} + \frac{i}{k_i R^2} - \frac{1}{k_i^2 R^3} \right) \vec{U} + \\ &+ \left(-\frac{1}{R} - \frac{3i}{k_i R^2} - \frac{3}{k_i^2 R^3} \right) \mathbf{e}_R \mathbf{e}_R,\end{aligned}$$

где $\mathbf{e}_R = \mathbf{R}/R$; $\mathbf{e}_R \mathbf{e}_R$ — диадное произведение; $k_i = k_0 \sqrt{\varepsilon_i}$;

$$\hat{\hat{M}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

После того как поле будет определено из уравнений (8) и (9) в зонде и объектах S и P , поле в точке расположения детектора может быть найдено из уравнения

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = k_0^2 \int_{V_T} \tilde{G}_{22}^{ff}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \Delta\epsilon_T(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}', \quad (11)$$

где $\tilde{G}_{22}^{ff}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$ — тензорная функция Грина в приближении дальней волновой зоны.

Решения систем (8) и (9) могут быть найдены численно. Общая схема решения включает дискретизацию области расчетов на отдельные ячейки, в которых предполагается поле постоянным, и затем решение системы линейных уравнений для определения электрического поля в каждой ячейке дискретизации [9, 10]. При решении системы линейных уравнений возникает проблема расходности для случая, когда $\mathbf{r} - \mathbf{r}' = 0$. Для преодоления этой трудности можно воспользоваться специальной

процедурой, развитой в [11], которая учитывает эффекты деполяризации.

Результаты численных расчетов

Уравнения (8) и (9) позволяют в принципе найти поле в любой точке системы для различного набора параметров. В данной работе мы предполагаем, что сигнал в детекторе пропорционален интенсивности (квадрату модуля) результирующего электрического поля в точке расположения детектора. Интенсивность рассчитывается как функция положения сканирующего зонда T . Расчеты выполнены для широкого набора параметров при режиме сканирования на постоянной высоте [2].

В качестве начала мы рассчитали электрическое поле в СБОМ собирающей конфигурации. Рис. 2, а и 2, б демонстрируют распределение интенсивности поля в плоскости сканирования без зонда для случая двух видов дефектов поверхности — выступа и впадины с одинаковыми размерами $60 \times 60 \text{ нм}^3$. Мы предполагаем, что падающая волна имеет ТМ-поляризацию, так как в этом случае распределение электрического поля в ближней зоне в основном передает топологию диэлектрической поверхности [9, 10].

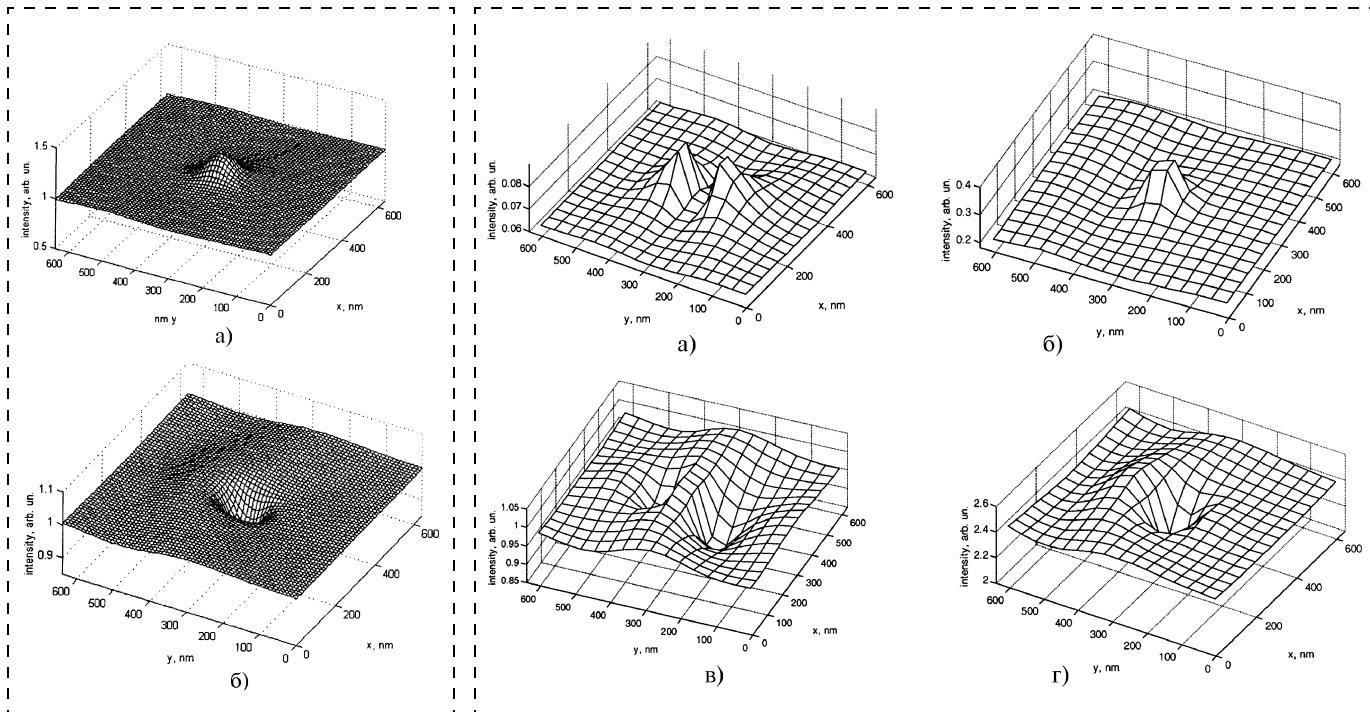


Рис. 2. Трехмерное представление распределения интенсивности (квадрата модуля) электрического поля в ближней зоне над поверхностью образца без учета зонда в рамках модели СБОМ собирающей конфигурации, ТМ-поляризация падающей волны:

а — поверхность с прямоугольным выступом;
б — поверхность с прямоугольной впадиной

Рис. 3. Модельное изображение дефектов плоской поверхности в СБОМ собирающей конфигурации:

а — интенсивность E_y -компоненты поля, дефект в виде выступа; б — интенсивность E_z -компоненты поля, дефект в виде выступа; в — интенсивность E_y -компоненты поля, дефект в виде впадины; г — интенсивность E_z -компоненты поля, дефект в виде впадины

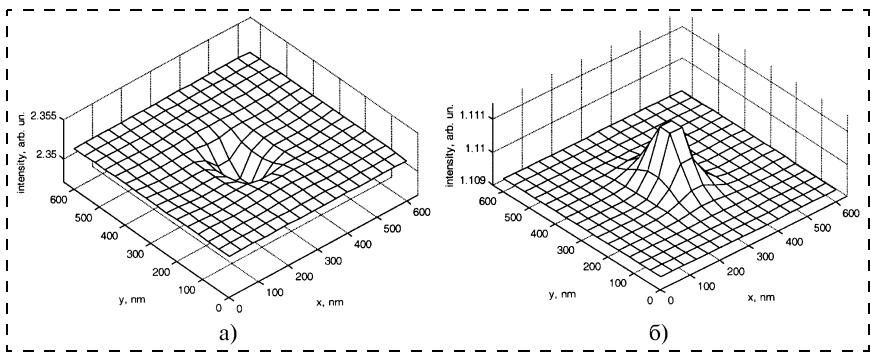


Рис. 4. Модельное изображение дефектов плоской поверхности в СБОМ облучающей конфигурации, внешнее поле имеет E_y -поляризацию:

a — дефект в виде впадины; *б* — дефект в виде выступа

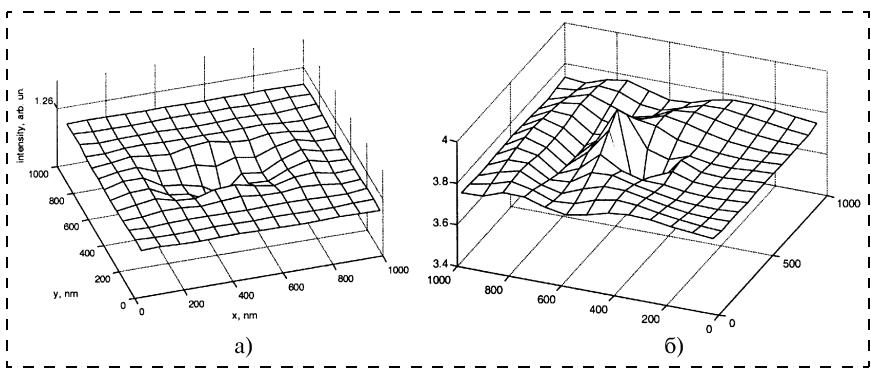


Рис. 5. Модельное изображение дефекта в виде впадины с размерами $40 \times 40 \times 40 \text{ нм}^3$, размер зонда — $80 \times 80 \times 80 \text{ нм}^3$, шаг сканирования 80 нм в СБОМ:

a — облучающей конфигурации; *б* — собирающей конфигурации

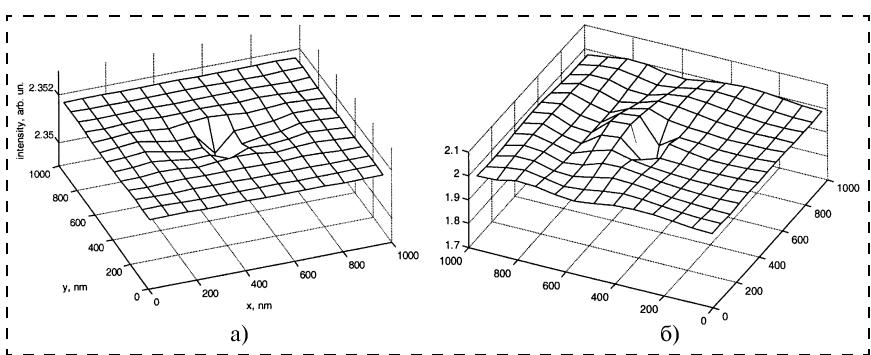
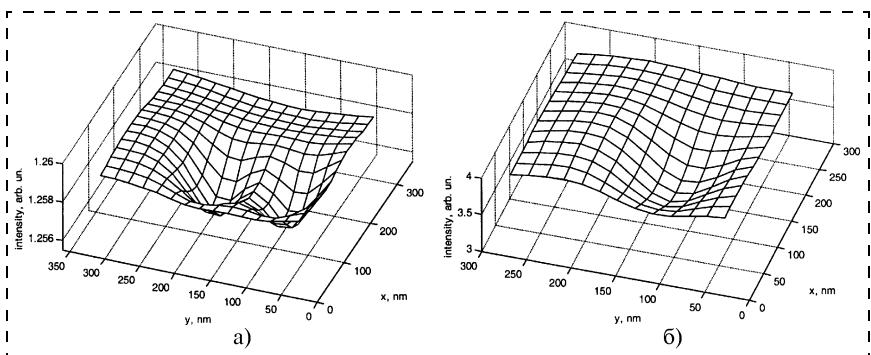


Рис. 6. Модельное изображение дефекта в виде впадины с размерами $40 \times 40 \times 40 \text{ нм}^3$, размер зонда — $20 \times 20 \times 80 \text{ нм}^3$, шаг сканирования 80 нм в СБОМ:

a — облучающей конфигурации; *б* — собирающей конфигурации



Результаты, представленные на рис. 2, можно сравнить с результатами на рис. 3, где ближнеполевое изображение тех же самых объектов рассчитано как функция интенсивности поля в точке детектора от положения зонда с размерами $20 \times 20 \times 80 \text{ нм}^3$ при его сканировании. Мы предполагаем, что сигнал в точку расположения детектора приходит только от зонда. Заметим, что в этом случае поперечные размеры зонда меньше, чем соответствующие размеры дефектов поверхности и значительно меньше длины волны внешнего излучения.

Из сравнения изображений на рис. 2 и рис. 3 видно, что распределение z -компоненты электрического поля в месте детектора несет больше информации о геометрической форме дефектов, чем распределение y -компоненты. Из этого следует, что в данном случае лучшее разрешение микроскопа соответствует распределению z -компоненты электрического поля в дальней зоне. В связи с этим далее, рассматривая СБОМ собирающей конфигурации, мы ограничились только z -компонентой поля.

Рис. 4 демонстрирует изображения тех же самых поверхностных дефектов, что и на рис. 2 и 3, только рассчитанных для СБОМ облучающей конфигурации. Здесь размеры зонда и шаг сканирования те же, что и на рис. 3.

Из представленных результатов следует, что роль зонда с относительно малыми поперечными размерами более существенна в случае собирающей конфигурации из-за наличия поверхностных волн. Эти волны рассеиваются поверхностными дефектами и дополнительно зондом, что увеличивает роль интерференционных эффектов. Поэтому разрешение в собирающей конфигу-

Рис. 7. Модельное изображение дефекта в виде впадины с размерами $40 \times 40 \times 40 \text{ нм}^3$, размер зонда — $80 \times 80 \times 80 \text{ нм}^3$, шаг сканирования 20 нм в СБОМ:

a — облучающей конфигурации; *б* — собирающей конфигурации

рации зависит от интерференционного взаимодействия между зондом и поверхностными дефектами.

Из рис. 3 и рис. 4 также видно, что облучающая конфигурация является более информативной относительно локализации и формы наноскопических объектов в образце. Однако эта ситуация может изменяться, если поперечные размеры зонда превышают размеры поверхностных дефектов (см. ниже).

Результаты, представленные на рис. 5, 6 и 7, иллюстрируют зависимость изображений впадины от размера зонда и шага сканирования (мы рассматриваем впадину, так как объектам под поверхностью в литературе уделялось меньше внимания, чем на поверхности).

Рис. 5 представляет изображения для случая, когда и шаг сканирования и поперечные размеры зонда превышают поперечные размеры дефекта. Сравнивая эти результаты с изображением на рис. 6, которое было получено для того же шага сканирования, но для зонда с меньшими поперечными размерами, чем размеры дефекта, мы видим, что увеличение размеров зонда и шага сканирования ведет к более сложной картине распределения интенсивности. Это усложнение связано с увеличением числа индуцированных диполей в зонде при увеличении его поперечных размеров и с их взаимодействием с диполями на границе впадины. Как следствие, это может приводить к ошибочным выводам в микроскопии собирающей конфигурации, т. е. сигнал от впадины может быть отнесен к сигналу от выступа (см. рис. 5, б и рис. 3) за счет увеличения интенсивности сигнала на одной из сторон впадины.

На рис. 7 представлен результат для случая, когда размеры зонда превышают размеры дефекта (впадины), а шаг сканирования выбирается меньше всех этих значений. Из рисунка видно, что разрешение значительно уменьшается. Более того, в случае облучающей конфигурации (рис. 7, а) взаимодействие между индуцированными в зонде диполями и границами впадины на поверхности образца ведет к значительному изменению ближнеполевого изображения по сравнению со случаем тонкого зонда. Это изображение похоже на изображение впадины, получающееся в собирающей конфигурации в режиме ТЕ-поляризации падающей волны.

Таким образом, из выполненных расчетов мы видим, что контраст изображений сильно зависит от поперечных размеров зонда и шага сканирования, что всегда следует иметь в виду при интерпретации изображений в СБОМ.

Заключение

Используя МИУ, мы построили теоретическую модель для СБОМ двух конфигураций. Данная модель позволяет рассмотреть процесс формирования изображения в СБОМ изнутри с учетом влияния зонда.

В рамках этой модели получены изображения для различных параметров зонда и при различных шагах сканирования. Показано, что изображение диэлектрических выступов и впадин на поверхности диэлектрического образца может существенно зависеть от соотношений между поперечными размерами зонда, размером поверхностных дефектов и от значения шага сканирования. Модель может быть расширена на случай анизотропных материалов, включая и их металлические свойства.

Список литературы

1. Bozhevolnyi S. I. In Optics of Nanostructured Materials / Edited by V. M. Markel and T. F. George. New York: Wiley, 2001.
2. Greffet J.-J., Carminati R. Image formation in near-field optics // Prog. in Surf. Sci. 1997. 56. P. 133.
3. Dereux A., Girard Ch., Weeber J.-C. Theoretical principles of near-field optical microscopy and spectroscopy // J. of Chem. Phys. 2000.
4. Girard Ch., Dereux A. Near-field optics theory // Rep. Prog. Phys. 1996. 59, 657.
5. Girard Ch., Joachim Ch., Gauthier S. The physics of the near-field // Rep. Prog. Phys. 1996. 63. P. 893.
6. Evlyukhin A. B., Evlyukhina E. V., Bantser R. M., Levkin S. G., Parfenova N. N. In Microscopy of Semiconducting Materials, edited by A. G. Cullis and J. L. Hutchison. Bristol: Institute of Physics. UK, 2001.
7. Van Labeke D., Barchiesi D. Probes for scanning tunneling optical microscopy: a theoretical comparison // J. Opt. Soc. Am. A. 1993. 10. 2193.
8. Матвеев А. Н. Электродинамика. М.: Высшая школа, 1980.
9. Li Z., Gu B., Yang G. Modified self-consistent approach applied in near-field optics for mesoscopic surface defects // Phys. Rev. B. 1997. 55. 10883.
10. Girard Ch., Dereux A., Martin O. J. F., Devel M. Generation of optical standing wave around mesoscopic surface structure: scattering and light confinement // Phys. Rev. B. 1995. 52. 2889.
11. Yaghjian A. D. Electric dyadic Green's functions in the source region // Proc. IEEE. 1980. 68. 248.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 621.797

С. И. Рембеза, д-р физ.-мат. наук,
Т. В. Свистова, канд. техн. наук,
Е. С. Рембеза, канд. физ.-мат. наук,
В. В. Милашечко,
 Воронежский государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ ПЛАТИНЫ НА СВОЙСТВА ПЛЕНОК ДИОКСИДА ОЛОВА, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ДАТЧИКАХ ГАЗОВ

В тонких газочувствительных пленках SnO_2 , полученных методом реактивного распыления оловянной мишени, исследовано влияние легирования платиной на электрические свойства в интервале температур 20...400 °C. Исследованы изменения концентрации и подвижности носителей зарядов в зависимости от содержания платины (от 0,5 до 3 вес. %). Установлено, что в результате введения платины повышается газовая чувствительность, снижается температура максимальной чувствительности карами этанола и ацетона в воздухе.

Введение

Оксиды металлов находят все более широкое применение в технике и электронике в виде полученных различными методиками керамик, спеченных слоев и пленок. Оксиды металлов (SnO_2 , In_2O_3 , Ga_2O_3 и др.) являются перспективными материалами для газочувствительных слоев твердотельных датчиков газов. В частности, диоксид олова интенсивно применяется в качестве чувствительных элементов сенсоров для определения различных газов в атмосферном воздухе. Принцип действия этих сенсоров основан на модуляции приповерхностной области пространственного заряда и изменении электросопротивления кристаллов пленки при адсорбции молекул газов. Уменьшение размеров зерен в поликристаллической пленке повышает газовую чувствительность и эффективность работы датчика газа [1]. Известно, что улучшить газочувствительные свойства пленок металлооксидных полупроводников можно также добавлением в объем небольших концентраций благородных металлов, таких как палладий, платина и серебро [2, 3]. Целью настоящей работы является изучение влияния примеси платины на электрофизические характеристики и газовую чувствительность пленок диоксида олова.

Методика изготовления и основные параметры пленок SnO_2 , легированных платиной

Нелегированные пленки SnO_2 изготовлены методом ионно-лучевого реактивного распыления оловянной мишени на установке, созданной на основе вакуумного напылительного поста УВН-2Н. Распыление проводилось на стеклянные подложки в среде Ar (25 %) и O_2 (75 %) при следующих режимах работы: давление аргона в камере 0,66...1 Па, ток плазмы 15 А при напряжении 2 кВ, ток накала катода 35...50 А при напряжении 5...10 В, расстояние мишень—подложка 5—10 см.

Толщина пленок, измеренная на интерференционном микроскопе МИИ-4, составляла 1...1,5 мкм. Результаты рентгеновского микроанализа, проведенные на приборе Link-analyser-1000, показали, что содержание олова составляет 29,5 ат. %, а содержание кислорода — 70,5 ат. %.

Легирование пленок SnO_2 примесями палладия и платины в разных весовых количествах проводилось методом пропитки [4]. В качестве пропитки использовали водный раствор H_2PtCl_6 . Водные растворы в рассчитанных для каждого образца весовых процентах наносились с помощью шприца на холодную подложку. Затем образцы подвергали сушке: сначала 20—30 мин при температуре 100 °C, а затем вжиганию на воздухе при температуре 500 °C в течение 4—6 ч. Расчетное количество введенной примеси платины составляло от 0,5 до 3,0 вес. %.

Все пленки после поверхностного легирования методом пропитки примесью платины имели матово-желтый цвет. Для стабилизации поверхностного сопротивления пленок SnO_2 , полученных методом ионно-лучевого напыления и легированных платиной, был выбран следующий режим обработки образцов: $T = 500$ °C, $t = 6$ ч, с контролем поверхностного сопротивления через каждый час.

На рис. 1 показано, как зависит поверхностное сопротивление пленки SnO_2 от количества введенной добавки после отжига на воздухе в течение 6 ч при $T = 500$ °C.

Результаты эксперимента показывают, что легирование пленок SnO_2 примесью платины свыше 1,5 вес. % практически не изменяет электрическое сопротивление пленок.

Фазовый состав пленок SnO_2 , легированных примесью платины, исследовался рентгеновским дифракционным методом на приборе ДРОН-4 с использованием медного анода и K_{α} -излучения по стандартной методике. Рентгеновский анализ пле-

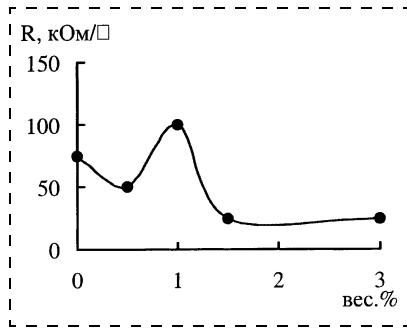


Рис. 1. Зависимость стабилизированного сопротивления от процентного содержания примеси платины в пленках SnO_2

нок SnO_2 непосредственно после получения ионно-лучевым напылением свидетельствовал об аморфности структуры. Проведение изотермического отжига при $T = 500^\circ\text{C}$ в течение 4 ч позволило определить фазовый состав исходных пленок SnO_2 и пленок, легированных платиной.

На дифрактограммах наблюдается система рефлексов, присущих кристаллической структуре SnO_2 . Легирование платиной дает фазу PtSn_4 , а также слабые рефлексы, соответствующие чистой платине. Из фазового анализа можно заключить, что в результате легирования примесь платины проникает в объем пленки SnO_2 и образует химическое соединение PtSn_4 . Не исключено, что часть примеси может преципитироваться в объеме и на поверхности пленки в виде металлических частиц или кластеров. Наиболее интенсивные дифракционные максимумы в пленках $\text{SnO}_2(\text{Pt})$ наблюдаются от кристаллографических плоскостей (110), (211) и (101). Оценка средних размеров зерен по формуле Шеррера дает значение порядка 35 нм.

Электрические свойства пленок SnO_2 , легированных платиной

Концентрация и подвижность носителей заряда в пленках $\text{SnO}_2(\text{Pt})$ измерялись раздельно с помощью эффекта Холла методом Ван-дер-Пау в широком интервале температур ($20\ldots400^\circ\text{C}$).

Введение примеси платины в количествах $0,5\ldots1,5$ вес. % не увеличивает подвижности носи-

телей заряда в пленках, и она практически совпадает с подвижностью носителей в нелегированных пленках SnO_2 . Однако при концентрации примеси 3,0 вес. % Pt значение подвижности увеличивается почти на два порядка (рис. 2).

Концентрация электронов в SnO_2 с увеличением содержания платины в пленках вначале увеличивается, а затем уменьшается по сравнению со значением в нелегированных образцах (рис. 3).

Уменьшение концентрации носителей заряда в результате легирования пленок SnO_2 примесью платины может произойти по нескольким причинам. Примесь может создать глубокий уровень в запрещенной зоне SnO_2 и частично компенсировать мелкий примесный уровень, обусловленный вакансиями кислорода. Однако из температурной зависимости концентрации электронов в легированных платиной пленках можно оценить энергию активации примесного уровня, которая составляет значение $\Delta E \approx 0,2$ эВ, что мало отличается от примесной активации нелегированных образцов. Другой причиной уменьшения концентрации свободных носителей в SnO_2 может быть появление в объеме пленки и на ее поверхности металлических включений платины с работой выхода электронов (4,8 эВ), превышающей работу выхода из пленки SnO_2 (4,5 эВ) [3], что приводит к локальному увеличению областей пространственного заряда под металлическими включениями и уменьшению эффективной концентрации электронов в микрокристаллах.

Газочувствительные свойства пленок SnO_2 , легированных платиной

Газовая чувствительность пленок определялась как отношение сопротивления пленки на воздухе R_{B} к сопротивлению пленки при напуске в кювету известной концентрации исследуемого газа R_{g} :

$S_g = \frac{R_{\text{B}}}{R_{\text{g}}}.$ Часто газовую чувствительность пред-

ставляют в терминах изменения проводимости:

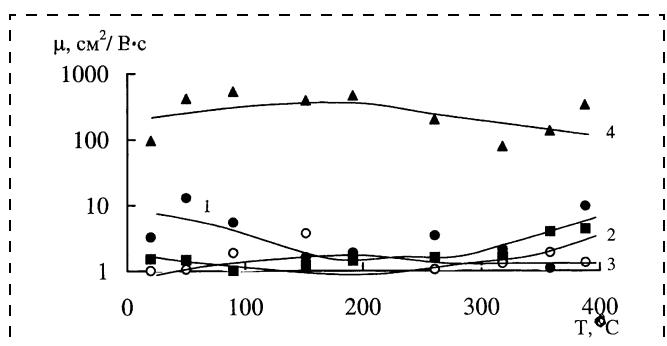


Рис. 2. Температурная зависимость подвижности свободных носителей заряда пленок SnO_2 , легированных платиной:

1 — нелегированная пленка; 2 — 0,5 вес. % Pt; 3 — 1,5 вес. % Pt; 4 — 3,0 вес. % Pt

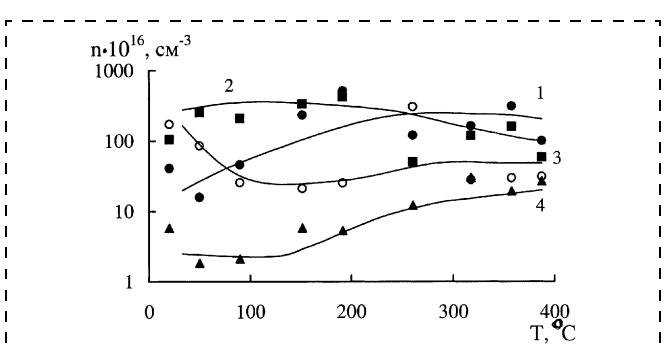


Рис. 3. Температурная зависимость концентрации свободных носителей заряда в легированных платиной пленках SnO_2 :

1 — нелегированная пленка; 2 — 0,5 вес. % Pt; 3 — 1,5 вес. % Pt; 4 — 3,0 вес. % Pt

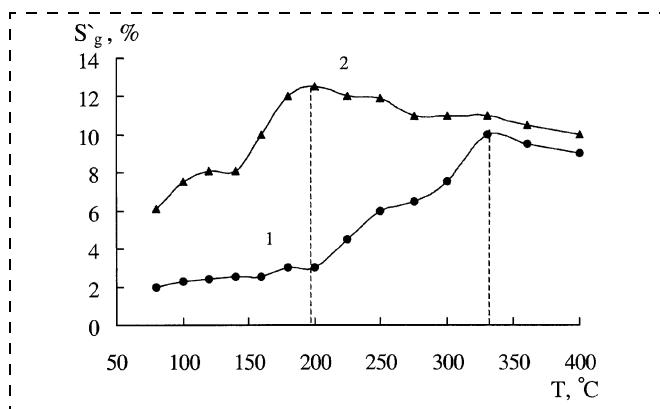


Рис. 4. Температурная зависимость газовой чувствительности пленок SnO_2 при концентрации этанола в воздухе порядка 1000 ppm:
1 — нелегированная пленка SnO_2 ; 2 — легированная пленка SnO_2 в количестве 3,0 вес. % Pt

$$G = S'_g = \frac{G_\Gamma - G_B}{G_B} \cdot 100 \% = \left(\frac{G_\Gamma}{G_B} - 1 \right) \cdot 100 \% = \\ = \left(\frac{R_B}{R_\Gamma} - 1 \right) \cdot 100 \% = (S_g - 1) \cdot 100 \%,$$

где $G = 1/R$ — проводимость пленки на воздухе (G_B) или в газе (G_Γ). Таким образом, $S'_g = (S_g - 1) \cdot 100 \%$.

Для каждого газа при взаимодействии с пленкой SnO_2 имеется характерная температура максимальной физической адсорбции или максимальной газовой чувствительности.

Исследовалось влияние примеси платины на температуру максимальной газовой чувствительности пленок SnO_2 . Установлено, что нелегированные пленки SnO_2 обладают максимальной газовой чувствительностью к этанолу при $T = 330^\circ\text{C}$ (рис. 4), к ацетону при $T = 360^\circ\text{C}$ (рис. 5).

Зависимости температуры максимальной газовой чувствительности пленок к парам этанола и ацетона от содержания примеси платины в пленках приведены на рис. 6.

Как видно из рис. 4 и 5, примесь платины в пленках SnO_2 не только снижает температуру максимальной чувствительности к этанолу в воздухе, но и несколько увеличивает коэффициент чувствительности пленок. В настоящее время рассматриваются два механизма влияния катализаторов на газовую чувствительность пленок SnO_2 [3]:

- каталитический механизм, приводящий к снижению порога реакции газа с пленкой и снижающий температуру максимальной чувствительности пленки;
- электронный механизм, заключающийся в образовании в пленке и на ее поверхности кластеров металла, имеющих работу выхода электро-

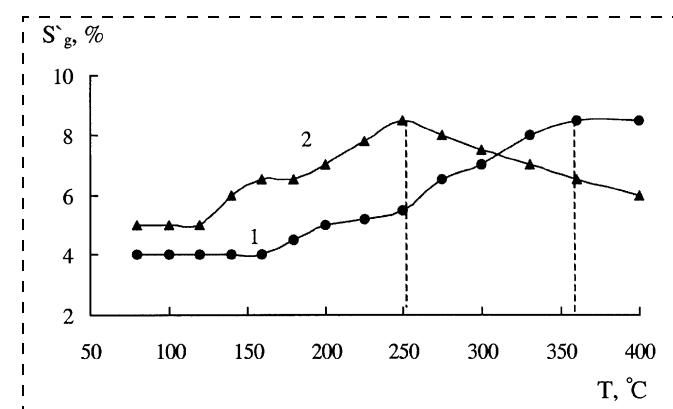


Рис. 5. Температурная зависимость газовой чувствительности пленок SnO_2 при концентрации ацетона в воздухе порядка 1000 ppm:
1 — нелегированная пленка SnO_2 ; 2 — легированная пленка SnO_2 в количестве 3,0 вес. % Pt

нов меньше, чем работа выхода электронов из пленки SnO_2 (спилловер-эффект).

В последнем случае вблизи примесных кластеров образуются области пространственного заряда, обедненные электронами по сравнению с объемом пленки. Эта модель согласуется с уменьшением средней концентрации носителей заряда в пленке и с повышением ее газовой чувствительности за счет электронного механизма влияния примеси на свойства пленок SnO_2 .

В случае катализитического эффекта металлы, легирующие поверхность, могут действовать как особые адсорбционные центры для диссоциации O_2 в воздухе и могут увеличить поверхностную концентрацию реагирующих O-составляющих, т. е. действовать в качестве катализаторов. Снижение температуры максимальной чувствительности при малом изменении чувствительности указывает на преобладание каталитического механизма влияния примеси платины на газовую чувствительность пленок.

Установившаяся зависимость газовой чувствительности $S'_g(C)$ при постоянной температуре от концентрации определяемого газа в воздухе представляет собой статическую характеристику газовой чувствительности.

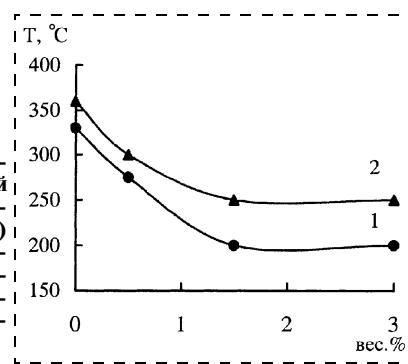


Рис. 6. Зависимость температуры максимальной газовой чувствительности к парам этанола (1) и ацетона (2) при концентрации в воздухе порядка 1000 ppm от содержания примеси платины в пленках SnO_2

Статические характеристики газовой чувствительности пленок SnO_2 , нелегированных и легированных платиной, представлены на рис. 7. Как видно из рис. 7, с увеличением количества введенной примеси в пленку SnO_2 повышается их газовая чувствительность и падает температура максимальной газовой чувствительности.

Добавка платины в количестве 0,5–3,0 вес. % увеличивает газовую чувствительность к парам спирта в 2–3 раза, как показано на рис. 7. Причем, по мере увеличения концентрации газа чувствительность пленок возрастает. Такое увеличение газовой чувствительности характеризуется также показателем степени зависимости чувствительности от концентрации газа [5]: $S = c^x$. Для нелегированных пленок $x = 0,5$, а для легированных пленок $x = 1,25$. При увеличении количества примеси в пленке SnO_2 наблюдается повышение газовой чувствительности и понижение температуры максимальной газовой чувствительности. Подобные зависимости статических характеристик от концентрации газа наблюдались и для ацетона.

Исследовались динамические характеристики нелегированной пленки SnO_2 и пленки, легированной примесью платины в количестве 1,5 вес. %. При введении нелегированной пленки SnO_2 в атмосферу спирта система приходит в равновесие за 3 мин для концентраций от 100 до 20 000 ppm. При удалении пленки из системы этанол—воздух поверхностное сопротивление восстанавливается за 1–2 мин. При помещении пленки SnO_2 , легированной платиной, в атмосферу этанола при разных концентрациях система уравновешивается за 2 мин, что практически не отличается от результата для нелегированной пленки SnO_2 . После удаления пленки из газовой атмосферы ее поверхностное сопротивление восстанавливается также за 1–2 мин.

Время установления равновесия в системе ацетон—воздух для пленок, легированных платиной, немного больше в отличие от таких же образцов,

легированных свинцом, и составляет от 4 до 6 мин. После удаления пленок из газовой среды их поверхностное сопротивление также восстанавливается за время, равное 2–4 мин. Таким образом, легирование пленок SnO_2 платиной практически не влияет на динамические характеристики газовой чувствительности пленок.

Заключение

В результате легирования примесь платины образует в объеме пленки SnO_2 химическое соединение PtSn_4 , при этом не исключено, что часть примеси может преципитироватьсь в объеме и на поверхности пленки в виде металлических частиц или кластеров. Введение примеси платины в количестве 0,5–1,5 вес. % не увеличивает подвижности носителей зарядов пленок, и она практически совпадает с подвижностью носителей нелегированных пленок SnO_2 . Однако при концентрации примеси 3,0 вес. % Pt значение подвижности увеличивается почти на два порядка. Уменьшение концентрации носителей заряда в результате легирования пленок SnO_2 примесью платины может быть связано с образованием глубокого уровня в запрещенной зоне SnO_2 или с появлением в объеме и на поверхности пленки металлических включений платины с работой выхода электронов 4,8 эВ, превышающей работу выхода из пленки SnO_2 (4,5 эВ).

Таким образом, легирование пленок диоксида олова платиной приводит к снижению температуры максимальной газовой чувствительности пленок к парам этанола на 130 °C, ацетона на 110 °C, а также увеличивает коэффициент чувствительности пленок, что объясняется двумя механизмами влияния катализатора на газовую чувствительность пленок SnO_2 — катализитическим и электронным. Одновременно легирование платиной повышает селективность пленок SnO_2 к распознаванию примесей паров этанола и ацетона в воздухе.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Министерства образования РФ Т02-01.5-3497 и Т02-02.2-3484 и гранта РФФИ 03-02-96453.

Список литературы

- Бутурлин А. И., Габузян Г. А., Голованов Н. А., Бараненков И. В., Евдокимов А. В. и др. Полупроводниковые датчики на основе металлооксидных полупроводников // Зарубежная электронная техника. 1983. № 10. С. 3–38.
- Gautheron B., Labbeau M., Delabouglise G., Schmatz U. Undoped and Pd-doped SnO_2 thin films for gas sensor // Sensors and Actuators. 1993. В 15. Р. 357–362.
- Matsushima S., Teraoka Y., Yamazoe N. Electronic interaction between metal additives and tin dioxide in tin dioxide – based gas sensors // Jap. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 3. Р. 1798–1802.
- Рембеза С. И., Свистова Т. В., Борсякова О. И., Рембеза Е. С. Влияние примеси палладия на газочувствительные свойства пленок диоксида олова // Сенсор. 2001. № 2. С. 39–40.
- Гутман Э. Е. Влияние адсорбции свободных атомов и радикалов на электрофизические свойства полупроводниковых окислов металлов // Журн. физ. химии. 1984. Т. 58. Вып. 4. С. 801–821.

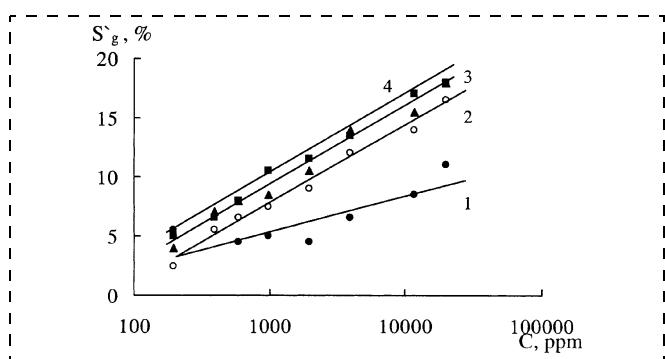


Рис. 7. Статические характеристики газовой чувствительности к парам этилового спирта для пленок SnO_2 , легированных платиной при разной температуре максимальной газовой чувствительности:

1 — нелегированная пленка, $T = 330$ °C; 2 — 0,5 вес. % Pt, $T = 275$ °C; 3 — 1,5 вес. % Pt, $T = 200$ °C; 4 — 3,0 вес. % Pt, $T = 200$ °C

ННОВАЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ В НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 389.159

П. А. Тодуа¹, В. А. Быков², Ч. П. Волк³,
Е. С. Горнев³, Ж. Желкобаев¹, Л. М. Зыкин,
А. Б. Ишанов, В. В. Календин¹,
Ю. А. Новиков⁴, Ю. В. Озерин³,
Ю. И. Плотников³, А. М. Прохоров¹,

А. В. Раков⁴, С. А. Саунин², В. Н. Черняков¹

¹ФГУП "Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума"
Госстандарт России, Москва.

²ЗАО "НТ-МДТ", Зеленоград.

³ОАО "НИИ молекулярной электроники и завод "Микрон", Зеленоград.

⁴Центр естественно-научных исследований
Института общей физики им. А. М. Прохорова
РАН, Москва

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛИНЫ В МИКРОМЕТРОВОМ И НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ И ИХ ВНЕДРЕНИЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКУ И НАНОТЕХНОЛОГИЮ ЧАСТЬ III*

Представлены основы метрологического обеспечения измерений, включая методы и средства воспроизведения и передачи размера единицы длины в указанном диапазоне с абсолютной привязкой к государственному первичному эталону единицы длины — метру, основанные на методах сканирующей зондовой микроскопии и лазерной интерферометрии — фазометрии. Разработана технология и созданы трехмерные меры микро-, нанорельефа поверхности, обеспечивающие не только калибровку зондовых микроскопов (сканирующих туннельных, атомно-силовых, растровых электронных) — основных средств линейных измерений в указанном диапазоне, но и подтверждающие достоверность результатов измерения размеров реальных объектов. Созданы алгоритмы и пакет программ, позволяющие реализовать автоматизированное трехмерное измерение рельефа поверхности конденсированных сред.

* Продолжение. Начало см. в № 1 и 2, 2004 г.

Внедрение концепции метрологического обеспечения линейных измерений в диапазоне 1 нм...100 мкм в электронную промышленность и нанотехнологию

Созданная в результате настоящей работы концепция метрологического обеспечения линейных измерений в диапазоне 1...1000 нм имеет большое практическое значение для такой важной народно-хозяйственной отрасли, как электронная промышленность, для которой контроль линейных размеров элементов сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) в технологическом процессе их изготовления является одной из важнейших задач. Особенno важен такой контроль на стадиях настройки новых технологических процессов, предназначенных для изготовления СБИС с минимальными размерами их элементов в диапазоне сотен и даже десятков нанометров [2, 3].

Изложенные выше результаты всего комплекса выполненных исследований позволили разработать автоматизированную систему линейных измерений элементов, формирующихся на полупроводниковой пластине СБИС, и внедрить ее на одном из ведущих предприятий электронной промышленности. Основными элементами этой системы являются: растровый электронный микроскоп (РЭМ), аттестованный Федеральным государственным унитарным предприятием "Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума" (ФГУП НИЦПВ) Госстандарт России, мера ширины и периода специальная МШПС-2.0К, аттестованная в той же организации Госстандарт России, алгоритмы и компьютерные программы, реализующие методы калибровки РЭМ и измерения на нем линейных размеров элементов СБИС, согласованные с указанной организацией Госстандарт России.

1. Алгоритмы и программное обеспечение автоматизированных линейных измерений в диапазоне 30 нм... 100 мкм

Алгоритмы, по которым проводится определение размеров элементов СБИС, приведены в предыдущей главе (см. журнал № 2, 2004 г.). Для их реализации была разработана программа обработки и анализа изображений элементов микроэлектронных структур, получаемых на растровых электронных микроскопах. Программа состоит из трех блоков, объединенных многооконным интерфейсом.

Первый блок предназначен для обработки изображения как целого, так и каждого видеосигнала

(ВС) по отдельности. При этом на ВС ищутся особые (контрольные) точки, связывающие параметры ВС и элементов микроструктур прямоугольного и трапециевидного профилей, описанные в ч. II (см. № 2, 2004 г.). На рис. 1 приведено изображение, демонстрируемое на компьютере для контроля за работой программы в процессе поиска таких точек. Цветовая кодировка изображения позволяет путем подбора соотношения цветов повысить возможности визуального поиска особенностей на изображениях реальных микроструктур.

Второй блок программы предназначен для калибровки РЭМ, вычисления увеличения микроскопа и размера его электронного зонда с помощью контрольных точек, полученных в первом блоке программы, используя формулы, представленные в ч. II данной работы (см. № 2, 2004 г.). Имеются три режима калибровки РЭМ с помощью:

- меры ширины и периода специальной МШПС-2.0К (основной режим);
- электронной метки, впечатываемой в кадр изображения;
- значения шага структуры, задаваемого вручную.

Третий блок программы предназначен для измерения линейных размеров элементов микроструктур. Предусмотрен режим измерения в широком диапазоне увеличений, специально разработанный для применения в промышленности. Этот режим позволяет после калибровки РЭМ в течение нескольких месяцев проводить измерения размеров микроструктур при **любом** увеличении микроскопа без дополнительной его калибровки. Без такого режима проведение автоматизированных измерений на РЭМ в промышленности невозможно. **Аналогов такого режима в мировой практике нет.**

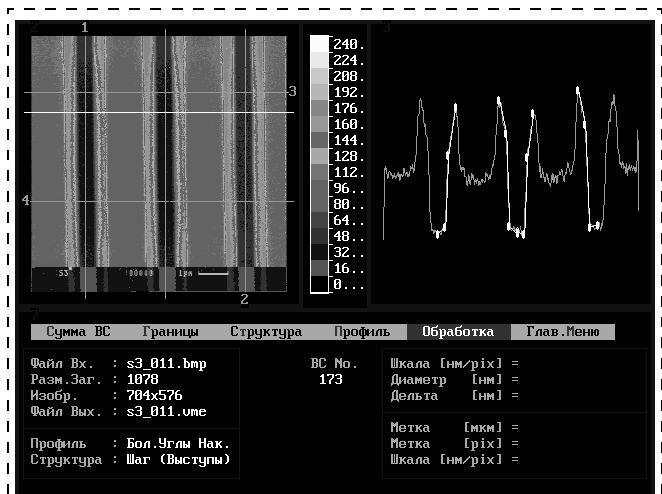


Рис. 1. Изображение, демонстрируемое на экране компьютера в процессе определения контрольных точек на видеосигналах

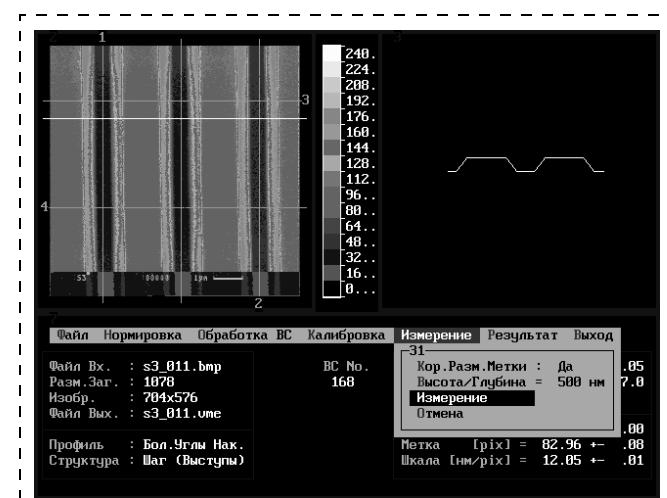


Рис. 2. Изображение, демонстрируемое на экране компьютера в процессе измерения размеров нижних и верхних оснований трапециевидных элементов микроструктур

На рис. 2 приведено изображение, демонстрируемое на компьютере для контроля за работой программы в процессе измерения размеров.

Программа работает под управлением операционных систем DOS и Windows 95, 98 и ME с изображениями, записанными в стандарте BMP. Работа программы протестирована на компьютерах с процессорами серии *Pentium*. Программа оформлена в виде независимого комплекса и может быть состыкована с любым современным растровым электронным микроскопом, оснащенным системой оцифровки изображений, а также работать независимо от микроскопа.

С помощью автоматизированной системы была проведена обработка данных измерения линейных размеров элементов меры BCR-97-A/G-7 (рис. 3), используемой в Национальном институте метрологии Германии.

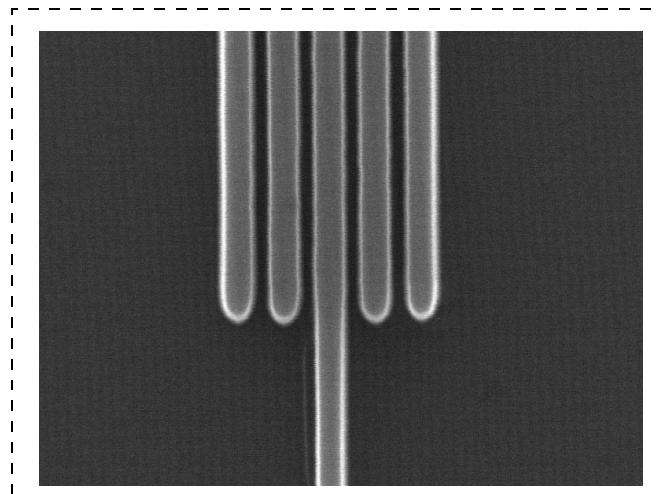


Рис. 3. Изображение меры BCR-97-A/G-7 (PTB, Германия) в РЭМ

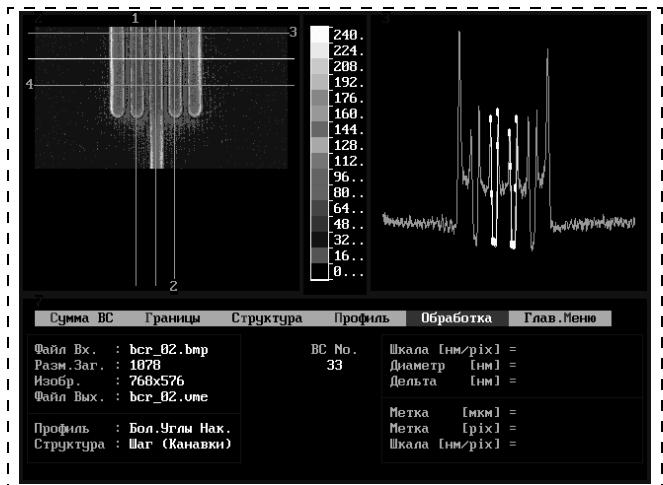


Рис. 4. Изображение, демонстрируемое на экране компьютера в процессе определения размеров меры BCR-97-A/G-7 (PTB, Германия)

логии (PTB, Германия) для калибровки РЭМ. На рис. 4 приведено изображение экрана компьютера при таких измерениях.

Размеры элементов такой структуры приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, минимальный размер элемента, измеренный с помощью автоматизированной системы, составляет 96 нм, что меньше, чем используемый в настоящее время в микроэлектронной промышленности США критический размер 130 нм. Размеры проекций наклонных стенок для такой структуры — $45,3 \pm 0,4$ нм для левой и $50,8 \pm 0,6$ нм для правой стенок центрального выступа (см. рис. 3). Эти размеры соответствуют уровню 2010 г. (см. табл. 2 ч. I данной работы в № 1, 2004 г.) Международной программы развития микроэлектроники.

Таблица 1

Измеренные размеры элементов меры BCR-97-A/G-7

| Элемент | Верх, нм | Низ, нм |
|---------|-----------------|-----------------|
| Выступ | $211,7 \pm 1,8$ | $300,3 \pm 2,3$ |
| Канавка | $194,0 \pm 1,5$ | $96,4 \pm 0,8$ |

2. Внедрение автоматизированной системы измерений в субмикрометровом диапазоне в практику контроля процессов производства микросхем в ОАО "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники и завод "Микрон"

Разработка автоматизированной системы измерения линейных размеров сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) в ОАО НИИМЭ и "Микрон" началась (совместно с ЦЕНИ ИОФ РАН и ФГУП НИЦПВ) в начале 1998 г., когда стало ясно, что используемый в то время способ контроля размера элемента на растровом электронном микроскопе по изображению скола либо фрагмента полупроводниковой структуры интегральных схем

(ИС) перестает удовлетворять требованиям текущего производства, и тем более, перспективного. Практически выполнялись только оценки размеров элементов, погрешность которых была сопоставима со значением технологического допуска, что не позволяло технологу сделать однозначный вывод о соответствии размера элемента проектной норме. Большим недостатком являлось также то, что измерения проводились практически вручную, при отсутствии какой бы то ни было автоматизации, и занимали достаточно большое время, если требовалось набрать статистический материал.

В связи с этим была поставлена задача создать рабочее место оператора-измерителя линейных размеров на РЭМ, включающее базовый РЭМ, систему автоматизированной обработки данных, в которую входят персональный компьютер, аналого-цифровая плата, позволяющая перенести видеоизображение с монитора РЭМ в память компьютера с внесенным в него пакетом программ, описанным выше в разд. 1.

В качестве базового измерительного прибора был избран имеющийся на предприятии растровый электронный микроскоп CamScan S-4. В качестве базового метода контроля был выбран предложенный специалистами ЦЕНИ ИОФ РАН метод измерения линейных размеров по видеосигналу, снимаемому при сканировании измеряемой структуры электронным лучом, и автоматизированная система обработки видеосигнала. Предварительно метод был опробован при измерениях размеров элементов, выполненных в различных топологических слоях, в том числе фоторезистовых, и показал хорошую точность и воспроизводимость. Пример измерений элементов структур фоторезистовых масок с шагом ~ 2 мкм приведен в табл. 2, где даны размеры верхних и нижних оснований элементов рельефа, левые и правые проекции их боковых граней на плоскость основания, а также средние значения этих проекций.

На основе предварительных испытаний метода и системы автоматизированной обработки видеосигнала было создано упомянутое выше рабочее место оператора-измерителя линейных размеров на РЭМ (РЭМ-компаратор), предназначенное для измерений линейных размеров элементов топологии (периода, шага, ширины линии) микрорельефа поверхности твердотельных структур с погрешностью Δl в зависимости от диапазона измеряемых величин l :

$$100 \text{ нм} < l < 2000 \text{ нм}, \quad \Delta l < 3 \text{ нм}; \\ 2 \text{ мкм} < l < 100 \text{ мкм}, \quad \Delta l = (3 + 10^{-3}l) \text{ нм}.$$

В состав РЭМ-компаратора входят растровый электронный микроскоп CamScan S-4, система обработки данных (включающая компьютер с про-

Таблица 2

Размеры элементов фоторезистовых масок с номинальным размером шага 2 мкм

| Фоторезист на поликремнии | | Размер, нм | Фоторезист на Si_3N_4 | | Размер, нм |
|---------------------------|-------------------------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Канавка | Верх Низ | 1158 ± 7 936 ± 12 | Канавка | Верх Низ | 1346 ± 4 1097 ± 10 |
| Проекция наклонной стенки | Левая Правая Среднее значение | 101 ± 10 129 ± 4 108 ± 9 | Проекция наклонной стенки | Левая Правая Среднее значение | 107 ± 6 141 ± 8 119 ± 4 |
| Выступ | Верх Низ | 1074 ± 5 1280 ± 8 | | | |
| Проекция наклонной стенки | Левая Правая Среднее значение | 111 ± 6 100 ± 9 103 ± 8 | | | |

цессором *Pentium 2*, программное обеспечение и блок сопряжения с РЭМ), мера ширины и периода специальная МШПС-2.0К, аттестованная на эталонной интерферометрической установке ФГУП НИЦПВ Госстандарта России.

Специалистами ФГУП НИЦПВ была проведена калибровка РЭМ-компаратора и выдан сертификат, разрешающий его применение для калибровки средств измерений линейных размеров микрорельефа поверхности твердотельных структур и измерений линейных размеров элементов. Калибровка установила следующие его параметры:

- диапазон измерений линейных размеров (периода, шага, ширины линии) — 0,1...20 мкм;
- среднее квадратичное отклонение менее 3 нм;
- дрейф увеличения РЭМ не превышает 10^{-4} ;
- нелинейность развертки РЭМ не превышает $7 \cdot 10^{-3}$;
- эффективный диаметр зонда РЭМ не превышает 90 нм;
- погрешность калибровки не превышает 1 %.

Таким образом, созданный РЭМ-компаратор позволяет измерять линейные размеры элементов микросхем в микрометровом и субмикрометровом диапазонах. На рис. 5 показан внешний вид РЭМ-компаратора.

Для калибровки РЭМ-компаратора применялась мера МШПС-2.0К, описанная в ч. II данной работы (см. № 2, 2004 г.). Специалистами ФГУП НИЦПВ в соответствии с МИ2013—89 ГСИ "Меры малой длины. Методика аттестации" и утвержденной методикой калибровки меры ширины и периода специальной меры МШПС-2.0К была проведена калибровка меры и выдан сертификат о калибровке средств измерений. Мера, как образцовое средство измерений, предназначена для калибровки и поверки контрольно-измерительного обору-



Рис. 5. За работой на РЭМ-компараторе ОАО НИИМЭ и "Микрон"

дования на основе фотоэлектрических оптических, растровых электронных, сканирующих тунNELьных и атомно-силовых микроскопов, лазерных дифрактометров и других средств, применяемых для измерений малых длин в диапазоне 0,1...20 мкм.

На калиброванном РЭМ-компараторе был проведен цикл экспериментальных измерений разнообразных структур, реально выпускаемых предприятием интегральных микросхем. Было показано, что система позволяет определять линейные размеры элементов топологии (шаг шаговых структур, ширину оснований и вершин канавок и выступов, проекцию боковой стороны трапециевидного элемента на его основание) практически в любых технологических слоях с погрешностями ~1—2 % от номинала во всем интервале имеющихся на схемах размеров от 350 нм и выше.

Минимальные размеры были измерены на структуре, предоставленной РТВ (Германия) и имеющей вид последовательности пяти шагов выступ—канавка в кремнии (размер шага — 399 ± 3 нм). Ширина нижнего основания канавки составила $96,4 \pm 0,8$ нм, а проекция боковой грани выступа, определенная нами — $45,3 \pm 0,4$ нм. Необходимо отметить, что время измерения (включая калибровку системы перед измерениями) существенно уменьшилось по сравнению с ранее использовавшейся методикой.

При положительных результатах предварительного опробования было обнаружено, что проведение измерений затрудняется тем, что калибровка микроскопа и определение размеров элемента разделены по времени. Это объясняется тем, что при переходе от калибровки к измерению требуется смена образца (линейной меры на измеряемый объект). При этом всегда меняется как увеличение РЭМ, так и его фокусировка (действующий диаметр зонда). Для минимизации ошибок измерения, связанных с фиксацией увеличения, был раз-

Таблица 4

Размеры элементов рельефа тестовой шаговой структуры в слое поликремния, полученные с помощью автоматизированного метода.
Погрешности измерений определяются неровностями краев элементов структур

| № структуры | Выступ | | Канавка | | Шаг, нм |
|------------------|----------|----------|----------|---------|-----------|
| | Верх, нм | Низ, нм | Верх, нм | Низ, нм | |
| 1 | 560 ± 8 | 706 ± 11 | 605 ± 10 | 458 ± 6 | 1160 ± 16 |
| 2 | 592 ± 8 | 741 ± 11 | 571 ± 10 | 427 ± 6 | 1168 ± 16 |
| 3 | 576 ± 8 | 793 ± 12 | 593 ± 12 | 372 ± 5 | 1175 ± 13 |
| 4 | 575 ± 7 | 787 ± 12 | 580 ± 10 | 376 ± 5 | 1161 ± 16 |
| Среднее значение | 576 ± 5 | 757 ± 8 | 587 ± 7 | 408 ± 4 | 1168 ± 10 |

Таблица 3
Сравнение измерений тестовых структур разными методами

| Тестовая структура | Проектная норма, нм | Автоматизированный метод | | Оценка по изображению, нм |
|--------------------|---------------------|--------------------------|--------------|---------------------------|
| | | Верх, нм | Низ, нм | |
| Затвор (поли-Si) | 400 | 358 ± 3 | 391 ± 2 | 420 |
| Шаг (поли-Si) | 1200 | 1106,7 ± 0,4 | 1106,7 ± 0,4 | 1200 |
| Выступ № 1 | — | 492 ± 3 | 503 ± 2 | 600 |
| Канавка | — | 630 ± 3 | 618 ± 2 | 600 |
| Выступ № 2 | — | 466 ± 3 | 477 ± 2 | — |

работан метод калибровки увеличения РЭМ с помощью электронной метки. (Подробное описание метода скоро будет опубликовано.) Разработанный метод калибровки метки и измерения линейных размеров микроструктур с использованием этой калибровки позволил проводить измерения на РЭМ-компараторе в широком диапазоне увеличений при периодической (в нашем случае ~1 раз в месяц) калибровке метки.

На основе результатов вышеизложенных работ была разработана "Методика измерения линейных размеров элементов микроструктур", по которой в настоящее время проводятся измерения линейных размеров при производстве ИС всех типов, выпускаемых в ОАО НИИМЭ и "Микрон".

В качестве примера в табл. 3 и 4 приведены результаты измерения по указанной методике различных элементов ИС с минимальным нормативным размером элемента, полученные на различных стадиях ее изготовления. Из таблиц видно, что определенные размеры находятся в пределах технологического допуска (10 % от размера), а погрешность измерений не превышает 2 % измеренного значения.

Таким образом, внедрение в ОАО НИИМЭ и "Микрон" комплекса метрологического обеспечения линейных размеров позволило существенно сократить время настройки технологических процессов производства СБИС с микрометровыми и субмикрометровыми элементами и успешно решить проблему обеспечения точности линейных размеров при серийном выпуске таких схем. Разработанный и внедренный комплекс впервые обеспечивает получение информации о ширине линии (размере верхнего и нижнего оснований отдельного элемента микросхемы) с точностью 1–2 % от номинала (неразрушающим способом). Аналогов таких измерений в мировой практике неизвестно (по открытym источникам).

В настоящее время измерительная служба ОАО НИИМЭ и "Микрон" обеспечена полностью укомплектованным рабочим местом оператора-измери-

теля линейных размеров на РЭМ для контроля размеров элементов СБИС на пластине в микрометровом и субмикрометровом диапазонах. В принципе такое рабочее место возможно организовать в технологической линии, но это требует больших затрат, которые для России пока не реальны. Как указывалось выше, на зарубежной тестовой кремниевой структуре показано, что измерения с помощью данной системы возможны до размеров элемента ~40–50 нм.

В ОАО НИИМЭ и "Микрон" с использованием комплекса метрологического обеспечения линейных измерений созданы различные варианты биполярной и КМОП-технологий, которые в настоящее время являются базовыми в производстве микросхем. На основе этих базовых технологий выпускаются микросхемы для комплектования различных систем и комплексов промышленного и оборонного значения. Разработка автоматизированной системы измерения линейных размеров элементов формирующихся на полупроводниковой пластине микросхем в ОАО НИИМЭ и "Микрон", и ее использование для базовых технологических процессов явилось результатом взаимодействия науки и производства.

3. Внедрение метрологического обеспечения измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах в производство сканирующих атомно-силовых микроскопов в ЗАО "НТ-МДТ"

Результаты разработки научных и технологических основ метрологического обеспечения измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах, изложенные в гл. 2 ч. II (см. № 2, 2004 г.), успешно применялись в ЗАО "НТ-МДТ" (НТ-МДТ) в течение трех лет (начиная с 1999 г.) для контроля параметров разных моделей сканирующих атомно-силовых микроскопов (АСМ), выпускаемых серийно.

Специалистами ЦЕНИ ИОФ РАН и НТ-МДТ были использованы разработанные методы определения эффективных диаметров острия кантиле-

веров (микрозондов) для осуществления контроля этих величин на различных типах кантилеверов, включая образцы с нитевидными остройями, с применением аттестованной специальной меры ширины и периода МШПС-2.0К.

Указанная мера применялась также и для контроля ортогональности пьезокерамических Z-сканеров, что позволило существенно улучшить качество регистрируемого изображения объектов рельефа поверхности твердого тела. В 2000 г. в ЗАО "НТ-МДТ" был организован и действует по настоящее время специальный участок контроля ортогональности Z-сканеров. Все выпускаемые фирмой атомно-силовые микроскопы проходят такой спецконтроль, в том числе и прибор модели Р7-SPMLS, предназначенный для работы в электронной промышленности.

Мера МШПС-2.0К с аттестованными параметрами профиля ее элементов рельефа использовалась для контроля воспроизводимости результатов линейных измерений на различных моделях АСМ (SMENA, Р7-SPMLS), для чего проводилось многократное (50—100 раз) сканирование одной и той же пары элементов меры в одном и том же положении образца. Результаты контроля показали, что воспроизводимость (отношение размера элемента при первом сканировании к размеру этого элемента при последнем сканировании) в пределах относительных ошибок эксперимента (3—5 %) остается равной единице.

4. Внедрение метрологического обеспечения измерений длины в диапазоне 1 нм...100 мкм во ФГУП "Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума"

Во ФГУП НИЦПВ создана, аттестована и эксплуатируется эталонная интерференционная установка на основе сканирующего зондового микроскопа, обеспечивающая передачу размера единицы длины в диапазоне 1...3000 нм со стандартной неопределенностью менее 1 нм от государственного первичного эталона единицы длины — метра, высокоточным рабочим средствам измерений.

На эталонной интерференционной установке аттестуются специальные меры малой длины и стандартные образцы нанорельефа поверхности — эталоны сравнения, предназначенные для поверки и калибровки зондовых микроскопов (растровых электронных, сканирующих тунNELьных и атомно-силовых, оптических ближнего поля) и других средств измерений, используемых в технике и технологии микро- и наноэлектроники.

Лазерная интерференционная измерительная система наноперемещений (ЛИИС-НП), входящая в состав эталонной установки, позволяет проводить калибровку прецизионных систем наноскани-

рования и микропозиционирования в диапазоне от единиц нанометра до десятка миллиметров с погрешностью менее 1 нм в реальном масштабе времени.

Создана, аттестована и эксплуатируется установка высшей точности на основе растрового электронного микроскопа, предназначенная для воспроизведения и передачи размера единицы длины в диапазоне 30 нм...100 мкм со стандартной неопределенностью 3 нм в диапазоне 30...2000 нм.

На основе голограммической решетки создан и широко применяется государственный стандартный образец ГСО 6261—91, предназначенный для калибровки растровых электронных микроскопов и пьезосканеров тунNELьных и атомно-силовых микроскопов. Стандартный образец выполнен в виде периодической рельефной структуры — голограммической решетки, с периодом 390 ± 1 нм на поверхности кремниевой подложки.

Высокие метрологические характеристики созданных эталонных средств измерений подтверждаются результатами международных круговых сличений периодических мер сравнения на эталонных интерференционных установках ВНИИ метрологии им. Д. И. Менделеева, ФГУП НИЦПВ и Международного бюро мер и весов (Париж), Федерального физико-технического института (Национального метрологического центра Германии, Брауншвейг).

На комплексе эталонных средств измерений проводятся метрологические работы по аттестации периодических мер (голограммических и дифракционных решеток), мер высоты ступени, мер ширины линии и других специальных мер, служащих для калибровки контрольно-измерительного оборудования, используемого в производстве микро- и наноэлектроники, микромеханики.

Заключение

Для обеспечения единства линейных измерений в диапазоне 1 нм...100 мкм созданы основы метрологического обеспечения измерений, включая:

- методы и средства воспроизведения и передачи размера единицы длины в указанном диапазоне с абсолютной привязкой к государственному первичному эталону единицы длины — метру, основанные на методах зондовой микроскопии и лазерной интерферометрии-фазометрии;
- разработана технология и созданы трехмерные меры микро- и нанорельефа поверхности, обеспечивающие не только калибровку зондовых микроскопов (сканирующих тунNELьных, атомно-силовых, растровых электронных) — основных средств линейных измерений в этом диапазоне, но и подтверждающие достоверность результатов измерений в зондовом микроскопе реального объекта в указанном диапазоне линейных размеров;

- установлены условия прямых измерений размеров нижнего основания и проекции боковой стенки на плоскость основания элементов рельефа с трапециевидным профилем по зарегистрированной кривой видеосигнала;
- созданы алгоритмы и пакет программ для автоматизированных трехмерных измерений рельефа поверхности конденсированных сред.

При измерениях сверхмалых перемещений стандартного образца атомарно чистой поверхности высоко ориентированного пирографита методами лазерной интерферометрии—фазометрии и сканирующей зондовой микроскопии определено межатомное расстояние, равное 0,24 нм, что соответствует значению постоянной кристаллической решетки.

Полученные результаты внедрены в практику аттестации государственных стандартных образцов микро-, нанорельефа поверхности и мер малой длины — материальных носителей размера единицы длины вnano- и микрометровом диапазонах, средств метрологического обеспечения линейных измерений (ФГУП "Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума" Госстандарта России), в метрологическое обеспечение производства изделий микроэлектроники (ОАО "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники и завод "Микрон") и в производство зондовых микроскопов для нужд наноэлектроники и нанотехнологии (ЗАО "НТ-МДТ").

Созданное автоматизированное рабочее место измерения линейных размеров элементов СБИС на базе растрового электронного микроскопа эксплуатируется в ведущей организации электронной отрасли ОАО "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники и завод "Микрон" для отработки базовых технологий изготовления СБИС с проектными нормами 500...800 нм и производства продукции.

Разработанное метрологическое обеспечение, реализующее возможности прямых измерений размеров верхних и нижних оснований элементов СБИС и не имеющее аналогов в мировой практике линейных измерений, используется в производстве электронной компонентной базы для стратегически важных систем.

Внедрение в ЗАО "НТ-МДТ" методик контроля параметров атомно-силовых микроскопов с использованием аттестованных мер МШПС-2.0К позволило существенно улучшить качество, расширить потребительские свойства выпускаемых сканирующих зондовых микроскопов (P7-SPMLS, P47, SMENA и других) и увеличить объем их продаж, в том числе на внешний рынок, в 2 раза.

Успешная эксплуатация в разных организациях в течение нескольких лет систем метрологического

обеспечения измерений в диапазоне 1 нм...100 мкм (1...3000 нм для наноперемещений и 30 нм...100 мкм для измерения ширины линии) показала, что выполняемые измерения размеров элементов тестовых структур и СБИС соответствуют метрологическим требованиям Международной программы развития полупроводниковой промышленности вплоть до 2010 года. Созданные меры МШПС-2.0К, конструкция которых запатентована в России, испытаны в России и в Европе (Федеральный физико-технический институт — Национальный метрологический центр Германии, Брауншвейг). Разработанное метрологическое обеспечение линейных измерений в микро- и нанометровом диапазонах подтверждено результатами международных круговых сличений, проведенных между организациями Госстандарта России и Международным бюро мер и весов (Париж).

Результаты выполненной комплексной работы являются базисом, на основе которого строится система измерений линейных размеров в диапазоне 1 нм...100 мкм. Перспективой дальнейшего использования результатов работы является внедрение научных и технологических основ метрологического обеспечения измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах в наукоемкие отрасли экономики Российской Федерации, в том числе в микроэлектронику, микромеханику и нанотехнологию.

Список литературы

1. Федорин В. Л. Государственный первичный эталон единицы длины // Российская метрологическая энциклопедия. С.-Петербург: Лики России. 2001. С. 228—231.
2. The National Technology Roadmap for Semiconductors. 1994. SIA. San Jose, California. USA. 168 p.
3. International Technology Roadmap for Semiconductors. 2001 Edition, Metrology. <http://public.itrs.net>.
4. Перечень критических технологий Российской Федерации. / Утвержден Президентом Российской Федерации 30 марта 2002 г. № ПР-578.
5. Nysson D. N. // J. Opt. Soc. Amer. 1982. V. 72. N 10. P. 1425.
6. Wilson T., Sheppard C. J. R. Theory and practice of the scanning optical microscopy. L: Acad. Press. 1984.
7. Postek M. T. Critical Issues in Scanning Electron Microscope Metrology // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 1994. V. 99. P. 641—671.
8. Новиков Ю. А., Раков А. В. Проблемы РЭМ-измерений размеров субмикронных элементов рельефа поверхности твердого тела (ч. 1 и ч. 2) // Микроэлектроника. 1996. Т. 25. № 6. С. 417—435.
9. Новиков Ю. А., Раков А. В. Метрология критических размеров элементов СБИС // Измерительная техника. 1999. № 1. С. 14—18.
10. Postek M. T. Critical-Dimension Metrology and the Scanning Electron Microscope // In "Handbook of silicon semiconductor metrology". Pt. 14. 2001. New York—Basel: Marcel Dekker. Inc. P. 205—333.
11. Nysson D. N., Postek M. T. SEM-based system for the calibration of linewidth SEM's for the IC industry // Proceedings SPIE. 1985. V. 565. P. 181—186.
12. Natsuzawa T., Toyoda K., Tanimura Y. Metrological Electron Microscope System for Microfeature of very Large Scale Integrated Circuits // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. N 3. P. 975—979.

13. **Huessler-Grohne W., Bosse H.** An electron optical metrology system for pattern placement measurements // Meas. Sci. Technol. 1998. V. 9. P. 1120–1128.

14. **Binning G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.** Tunneling through a control-lable vacuum gap // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 40. P. 178–180.

15. **Биннинг Г., Рорер Г.** Сканирующая тунNELьная микроскопия — от рождения к юности // УФН. 1988. Т. 151. № 2. С. 261–278.

16. **Бухареев А. А.** Диагностика поверхности с помощью сканирующей тунNELьной микроскопии // Заводская лаборатория. 1994. № 10. С. 15–23.

17. **Binning G., Quate C. F., Gerber Ch.** Atomic Force Microscope // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. P. 930–933.

18. **Быков В. А., Лемешко С. В., Новиков Ю. А., Раков А. В.** Исследование субмикронных канавок с помощью атомно-силовых микроскопов // Тезисы докладов 12 Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Черноголовка. "Богословский печатник". 2001. С. 173.

19. **Волк Ч. П., Новиков Ю. А., Раков А. В.** Калибровка РЭМ с помощью периодической линейной меры микронного и субметрового диапазонов // Измерительная техника. 2000. № 4. С. 48–52.

20. **Волк Ч. П., Горнев Е. С., Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Прохоров А. М., Раков А. В.** Тестовый объект для калибровки растровых электронных микроскопов // Патент на изобретение № 2207503. Дата приоритета 29.03.2001.

21. **Postek M. T., Keery W. J., Larrabee R. D.** The relationship between accelerating voltage and electron detection modes to linewidth measurement an SEM // Scanning. 1988. V. 10. P. 10–18.

22. **Postek M. T.** Low accelerating voltage SEM imaging and metrology using backscattered electrons // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 60. N 12. P. 3750–3754.

23. **Novikov Yu. A., Rakov A. V.** About Accuracy of Dimensions Measurements of Microrelief Elements in an SEM // Preprint N 3. General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences. 1996. 9 p.

24. **Hatsuzawa T., Toyoda K., Tanimura Y.** Metrological electron microscope system for microfeature of very large scale integrated circuits // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. N 3. P. 975–979.

25. **Miyoshi M., Kanoh M., Yamaji H., Okumura K.** A precise and automatic very large scale integrated circuit pattern linewidth measurement method using a scanning electron microscope // J. Vac. Sci. Technol. 1986. V. B4. P. 493–499.

26. **Postek M. T., Vladar A. E., Villarrubia J.** Is a Production Level Scanning Electron Microscope Linewidth Standard Possible? // Proceedings SPIE. 2000. V. 3998. P. 42–56.

27. **Новиков Ю. А., Раков А. В.** Вторичная электронная эмиссия рельефной поверхности твердого тела // Труды ИОФАН. 1998. Т. 55. С. 3–99.

28. **Kalendin V. V., Chernyakov V. N., Todua P. A., Zhelkovaev Zh.** Etalon Interferometric Comparator for 3D Measurements of Surface Topography Based on the Scanning Tuinnel and Atomic Force Microscopes // Progress in Precision Engineering and Nanotechnology (Proceedings of the 9th International Precision Seminar. Braunschweig, Germany) 1997. V. 1. P. 138–139.

29. **Новиков Ю. А., Пешехонов С. В., Стрижков И. Б.** Шелевидная линейная мера для калибровки растровых электронных микроскопов и измерений рельефных элементов в субмикронном и нанометровом диапазонах // Труды ИОФАН. 1995. Т. 49. С. 20–40.

30. **Новиков Ю. А., Стеколин И. Ю.** Калибровка растровых электронных микроскопов для измерения линейных размеров в субмикронном и нанометровом диапазонах // Труды ИОФАН. 1995. Т. 49. С. 41–65.

31. **Новиков Ю. А., Прохоров А. М., Раков А. В.** Эмиссия электронов из поверхностных состояний // Поверхность. Физика, химия, механика. 1993. № 3. С. 22–24.

32. **Волк Ч. П., Горнев Е. С., Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Прохоров А. М., Раков А. В.** Линейная мера микронного, субмикронного и нанометрового диапазонов для измерений размеров элементов СБИС на растровых электронных и атомно-силовых микроскопах // Микроэлектроника. 2002. Т. 31. № 4. С. 243–262.

УДК 537.533.2, 53.084.852

А. И. Труфанов,
А. С. Батурина, канд. физ.-мат. наук,
М. Ю. Лешуков,
Н. Н. Чадаев, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Е. П. Шешин, д-р физ.-мат. наук, проф.
 Московский физико-технический институт
 (государственный университет)

ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА С АВТОКАТОДОМ НА ОСНОВЕ ПУЧКА УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

Приведена статистика и проанализирован разброс эмиссионных характеристик катодолюминесцентных пальчиковых ламп. Рассмотрена возможная схема управления большим видеэкраном с автокатодными лампами и показана работа системы ламп.

Введение

Возможность использования углеродных волокон в качестве автоэмиссионного катода была показана достаточно давно [1]. В работах [2, 3] исследовались автокатоды из одиночных волокон с заостренным торцом. Было установлено, что заостренный торец волокна разрушается при отбиании тока выше 10 мА. В работе [4] описаны исследования эмиссионных свойств как отдельных волокон, так и пучков волокон. Было показано, что нестабильность тока уменьшается при определенных условиях обработки волокон в процессе изготовления и специальной тренировки автокатода. Повторяемость характеристик обеспечивается не только точностью межэлектродной геометрии, но и условиями тренировки, формирующими необходимую эмиссионную структуру автокатода непосредственно в приборе. Тренированное надлежащим образом одиночное волокно способно давать эмиссию до 100 мА в течение нескольких тысяч часов при вакууме $133,3 \cdot 10^{-7}$ Па (10^{-7} Торр) [5].

Одним из перспективных способов предварительной подготовки автоэмиссионного катода из углеродных волокон является остекловка пучка волокон. Источник света представляет собой катодолюминесцентную триодную пальчиковую лампу (рис. 1, а, см. третью сторону обложки), где в качестве автоэмиссионного катода используется пучок из 300 волокон (рис. 1, г), заключенных в стеклянный капилляр (рис. 1, в). В работе [6] описан электронный прожектор (рис. 1, б) и приведены данные о нестабильности эмиссионного тока катода, его причинах и способах улучшения шумовых

характеристик катода. Для определения эмиссионных свойств и отработки технологии изготовления катодов было произведено более 100 катодолюминесцентных ламп такой конструкции.

Целью данной работы является исследование эмиссионных характеристик опытной партии катодолюминесцентных источников света на предмет разброса параметров катодов, а также проверка работы источников света в прототипе модуля видеоэкрана, и анализ схемы управления.

Эмиссионные характеристики ламп

Для измерения эмиссионных характеристик источников света использовался стенд на основе АЦП ISO AD-32 и специально разработанное программное обеспечение. Стенд позволял снимать зависимость тока и напряжения с частотой 100 кГц. Диапазон измеряемых токов составлял 0,1...300 мА, напряжения — 10...5000 В. При снятии вольт-амперных характеристик блок питания обеспечивал изменение напряжения со скоростью 10^4 В/с.

В рабочем режиме на анод источника света подается высокое положительное напряжение +10 кВ, модулятор заземляется, а на катод подается высокое управляющее отрицательное напряжение (до -3 кВ). Значение управляющего напряжения выбирают так, чтобы максимальный ток катода не превышал 200...250 мА. При этом яркость отдельных источников света составляет более 45 000 Кд/м². Ограничение тока катода в рабочем режиме связано с тем, что при токе 400...500 мА увеличивается вероятность нарушения контакта углеродных волокон с электрическим выводом катода, что ведет к выходу из строя источника света.

При снятии эмиссионных характеристик источник света включался в диодном режиме: анод и модулятор электрически объединялись и заземлялись через резистор для измерения тока, а на катод подавалось регулируемое отрицательное напряжение. Диапазон измерения тока при этом составлял 0,1...50 мА. Преднамеренное снижение максимального тока катода в этом случае связано с тем, что при диодном включении источника света отсутствует высокое анодное напряжение. Вследствие этого при увеличении управляющего напряжения и больших токах катода (более ~100 мА) периферийные волокна могут отклоняться в стороны от основного пучка, и эмиссионные характеристики не будут соответствовать рабочему режиму.

Зависимость эмиссионного тока автокатода от управляющего напряжения аппроксимируется прямой с параметрами A и B в координатах Фаулера—Нордгейма. Набор характеристик опытной партии катодолюминесцентных источников света описывается набором соответствующих точек в координатах A и B (рис. 2, *a*). Такой способ анализа ха-

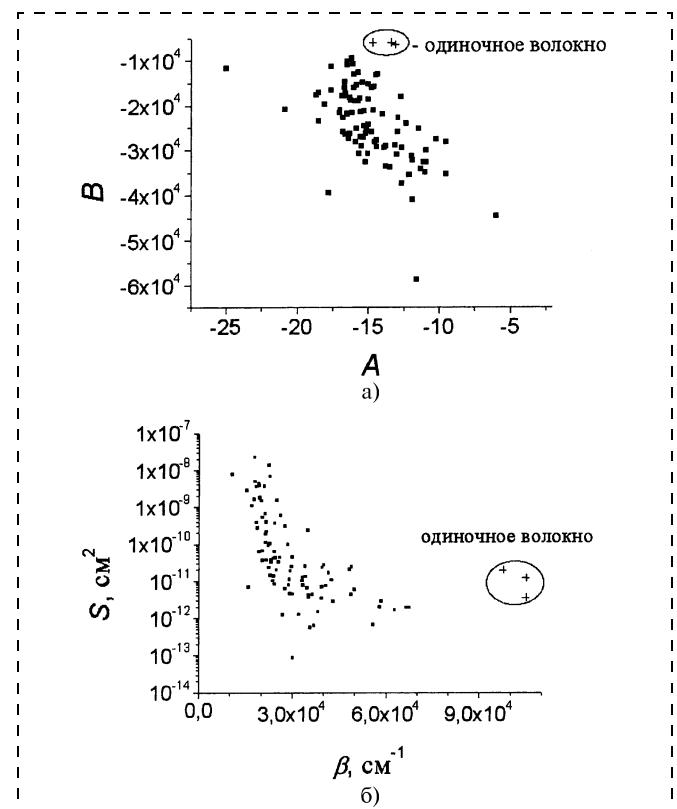


Рис. 2. Электрические параметры источников света и эмиссионные характеристики катодов:

a — параметры A и B источников света: $\ln\left(\frac{I}{U^2}\right) = A + B \frac{1}{U}$ (I — в амперах, U — в вольтах); *b* — значения S и β автокатодов опытной партии источников света

рактеристик аналогичен тому, что использован в работе [7] при изучении динамики изменения автоэмиссионных характеристик.

Следуя методу, изложенному в работе [8], из эмпирических параметров A и B можно восстановить площадь эмиттирующей поверхности S и коэффициента усиления электрического поля вблизи эмиттера β . Результаты расчета для катодов опытной партии источников света представлены на рис. 2, *b*. Для сравнения на рис. 2, *a* и 2, *b* также приведены значения параметров A и B и значений S и β для катодов из одиночных углеродных волокон.

Для катодов опытной партии источников света средние значения $S \approx 3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$ и $\beta \approx 3,0 \cdot 10^5 \text{ 1/см}$. Для катодов из одиночных волокон средние значения $S \approx 5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$ и $\beta \approx 1,05 \cdot 10^5 \text{ 1/см}$. Можно сделать вывод, что в пучке, содержащем более 100 волокон, вследствие разной длины и микрогеометрии волокон в пучке эмиттируют только несколько волокон. Аналогичный вывод сделан в работе [9]. Поэтому в качестве автоэмиссионного катода наиболее целесообразно использовать пучки из малого числа волокон (~10 шт.). Избыточное число воло-

кон в остееклованном пучке определяется только техническими возможностями опытного производства.

Область применения источников света с автокатодом

Одна из областей применения источников света — элемент информационных табло или видеоэкранов большого размера. Для демонстрации работоспособности источников света были собраны два модуля видеоэкрана, которые содержат по шестнадцать трехцветных (RGB) пикселей (рис. 3, см. третью сторону обложки).

Испытание модулей видеоэкрана проводилось в импульсном режиме. Схема включения модуля представлена на рис. 4, а. Блок питания состоит из регулируемого источника анодного напряжения (0...10 кВ) и трехканального высоковольтного генератора импульсов управляющего напряжения. Амплитуду формируемых отрицательных управляющих импульсов напряжения можно регулировать в пределах 0...4 кВ. Выходы генераторов через ограничительные резисторы по 10 МОм были подключены к катодам источников света. Резистивная обратная связь позволяет частично нивелировать различие в вольт-амперных характеристиках источников света и выровнить их яркостные характеристики в модуле. Источники света каждого цвета включались последовательно. Частота смены

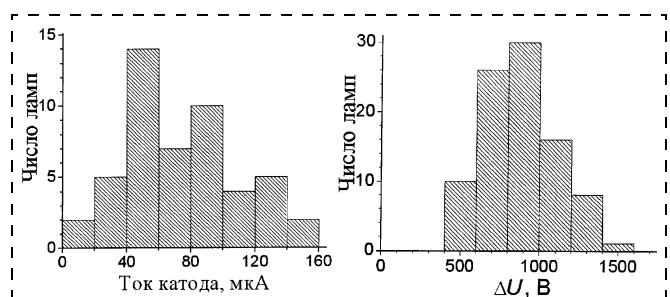


Рис. 5. Статистика разброса электрических параметров источников света при работе в модуле:

а — амплитуды тока источников света модуля видеоэкрана при импульсе управляющего напряжения $U_k = -2,5$ кВ;

б — изменение управляющего напряжения ΔU источников света, обеспечивающее изменение тока катода от 0,1 до 100 мА

кадров составляла 100 Гц. Временная диаграмма, поясняющая работу модуля видеоэкрана, представлена на рис. 4, б.

Потребляемая мощность модуля видеоэкрана не превосходила 20 Вт, или 0,1 Вт/см² в динамическом режиме при скважности включения каждого цвета, равной 3. По потребляемой мощности экспериментальный модуль приближается к экранам на светодиодах, являющихся наиболее экономическими. При яркости отдельного источника света 10^4 Кд/м² и плотности их упаковки в модуле 2/5 яркость модуля видеоэкрана по белому свету составляет $1,3 \cdot 10^3$ Кд/м² в динамическом режиме, что соответствует требованиям к светоизлучающим элементам для данной области применения.

Статистика разброса параметров источников света в модуле видеоэкрана

Эмиссионные параметры A и B источников света (см. рис. 2, а) позволяют определить амплитуду эмиссионного тока ламп в модуле при работе в импульсном режиме (рис. 5, а). Важным параметром источника света является изменение управляющего напряжения ΔU , приводящее к изменению автоэлектронного тока лампы от 0,1 до 100 мА. При таком изменении тока источника света обеспечивается контрастность модуля видеоэкрана больше 500. На рис. 5, б представлена гистограмма значений ΔU для источников света, составляющих модуль видеоэкрана. Среднее значение изменения управляющего напряжения ΔU для большинства источников света оказалось ниже 1 кВ. Таким образом, для экранных модулей на источниках света с автокатодами из пучков углеродных волокон возможно использование схем управления на существующих типах высоковольтных транзисторов.

Для удовлетворительной работы экранных модулей важен температурный интервал окружающей среды, в котором источники света не меняют су-

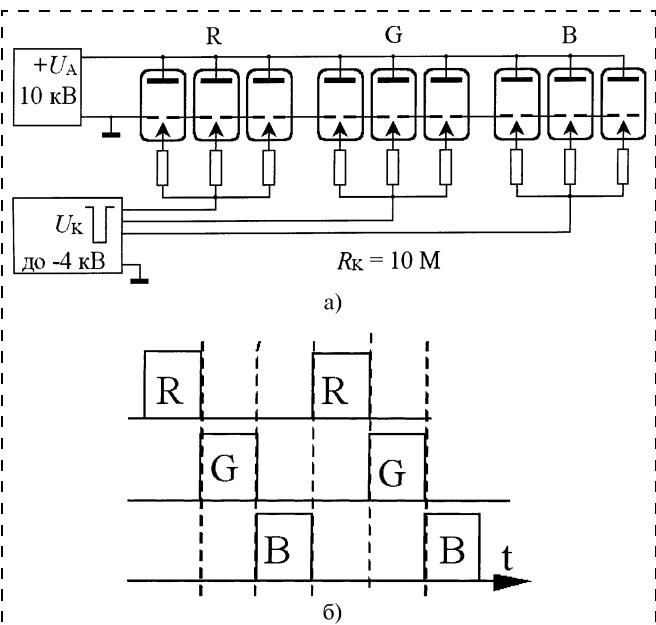


Рис. 4. Работа источников света в модуле видеоэкрана:
а — схема включения источников света в модуле видеоэкрана;
б — временная диаграмма включения источников света в модуле видеоэкрана.
Длительность импульса $\tau_p \approx 3$ мс; период $T \approx 10 \dots 100$ мс

щественно свои характеристики. Для его определения были проведены испытания источников света при изменении температуры окружающей среды в широких диапазонах. Оболочку источников света в работающем состоянии нагревали в открытом пламени до +150 °C (рис. 6, а, см. третью сторону обложки), охлаждали жидким азотом (рис. 6, б), создавали условия обледенения (рис. 6, в). Во время этих операций визуальных изменений в работе источника света не наблюдалось.

Заключение

Применение источников света с автокатодом из углеродных волокон в качестве элементов информационных табло или видеоэкранов большого размера оправдано преимуществами автоэмиссии. Исследование разброса характеристик источников света показало возможность построения схемы управления с использованием существующих высоковольтных транзисторов. Разработанные катодолюминесцентные источники света имеют широкий диапазон рабочих температур от -150 до +150 °C, их яркость составляет 10^4 Кд/м², что не хуже современных аналогов, угол обзора более 160°, скорость включения/выключения пикселей менее 0,1 мс. Отсутствие греющихся частей, работа на малых токах (менее 100 мА на элемент) и достаточно длительный срок службы (более 10 000 ч) делает их конкурентно способными даже по сравнению с лучшими аналогами среди источников света: светодиодами, лампами накаливания, газоразрядными лампами.

Список литературы

1. Baker F. S., Osborn A. R., Williams J. Field emission from carbon fibers: A New Electron Source // Nature. 1972. V. 239. N 8. P. 96.
2. Colin Lea Field emission from carbon fibers // J. Phys. D: Appl. Phys. 1973. V. 6. P. 1105—1114.
3. Mousa M. S. Electro emission from carbon fiber tips // Appl. Surf. Sci. 1996. V. 94/95. P. 129—135.
4. Шешин Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов // М.: Физматкнига. 2001. С. 287.
5. Бондаренко Б. В., Макуха В. И., Шешин Е. П. Стабильность и долговечность некоторых вариантов автокатодов // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. № 8. С. 1649—1652.
6. Baturin A. S., Eskin I. N., Trufanov A. I. et al. Electron gun with field emission cathode of carbon fiber bundle // J. Vac. Sci. Technol. 2003. V. B21. N 1. P. 354—357.
7. Ishikawa J., Tsuji H., Gotoh Y. et al. // JVST. 1993. V. B11. P. 403.
8. Forbes R. G. // J. Vac. Sci. Technol. 1999. V. B17. P. 526.
9. Bobkov A. F., Davidov E. V., Zaitsev S. V. et al. Some aspects of the use of carbon materials in field electron emission cathodes // J. Vac. Sci. Technol. 2001. V. B19. N 1. P. 32—38.

УДК 539.211:681.723

П. А. Шиляев, Д. А. Павлов, д-р физ.-мат. наук,

А. Ф. Хохлов, д-р физ.-мат. наук,

Нижегородский государственный университет

им. Н. И. Лобачевского

e-mail:shilyaev@phys.unn.ru

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ СЗМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ*

Рассмотрены наиболее распространенные алгоритмы определения фрактальной размерности по данным сканирующей зондовой микроскопии. Алгоритмы применены к поверхностям с известной фрактальной размерностью. Определена погрешность расчета фрактальной размерности данными методами. Выделены наиболее точные алгоритмы.

Введение

Важную роль в задачах материаловедения и производства играет состояние поверхности материалов, в частности, ее геометрические параметры. Геометрия поверхности, от которой зависят многие физические свойства объектов может изменяться под воздействием различных видов обработки материалов или при изменении условий получения. При исследовании поверхности твердых тел с помощью сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) получить полную трехмерную информацию о поверхности объекта не представляет особых трудностей [1, 2]. Для ее количественного описания, как правило, рассчитываются некие статистические характеристики рельефа, например, размах высот, шероховатость, асимметрия, эксцесс и т. д. [3, 4].

Среди возможных параметров для геометрической характеристики поверхности особо выделяется *фрактальная размерность*, имеющая целый ряд преимуществ перед другими способами описания рельефа [5—7]. Одним числом, заключенным в интервале от 2 до 3 и практически не зависящим от амплитудных характеристик рельефа и масштаба, можно четко различить разные типы рельефа, что очень удобно для практического применения. Более того, фрактальная размерность поверхности непосредственно связана с внутренней структурой самого материала и его свойствами [8—10]; можно также изменять некоторые свойства материалов путем изменения фрактальности размерности [11].

*Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования РФ для аспирантов № А03-2.9-374.

При расчете фрактальной размерности по данным СЗМ применяются различные *геометрические методы расчета*, основанные на геометрическом определении фрактальной размерности. Исследования показывают, что значение фрактальной размерности, рассчитанное разными методами, может различаться для одних и тех же исходных данных [12]. Более того, разные методы характеризуются различной точностью расчета фрактальной размерности. Цель настоящей статьи — рассмотреть наиболее распространенные методы расчета фрактальной размерности и выделить наиболее точный алгоритм ее расчета.

Создание поверхностей с заданной фрактальной размерностью

Для определения точности расчета фрактальной размерности различными методами необходимо иметь некую тестовую поверхность с заранее известной фрактальной размерностью. Применяя подход, описанный в работе [12], в качестве тестовых объектов были выбраны поверхности, сгенерированные с помощью алгоритма случайного сложения Фосса [13]. Этот метод позволяет строить реалистичные поверхности с заданной размерностью.

В данной статье используется *модифицированный алгоритм Фосса* [7, 13]. Суть этого метода состоит в следующем. Выбирается квадратная сетка размером 1025×1025 точек. В четырех углах сетки фиксируется высота $z = 0$. В алгоритме генерируются случайные гауссовые числа $\xi(n)$ с нулевым средним и дисперсией, задаваемой выражением

$$\sigma_n^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^{2n(3-D)}, \quad (1)$$

где n — номер шага генерации поверхности; D — задаваемая фрактальная размерность.

На первом этапе (шаг 0) получается одно случайное число с дисперсией 1 — оно используется как уровень поверхности в центре сетки. На втором этапе генерации сначала выполняется интерполяция и вычисляется высота в четырех точках с координатами $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4})$, $(\frac{3}{4}, \frac{1}{4})$, $(\frac{1}{4}, \frac{3}{4})$ и $(\frac{3}{4}, \frac{3}{4})$, изме-

ренных в таких единицах, при которых сторона квадрата сетки равна 1. Результат интерполяции — это простое среднее арифметическое от высот в соседних точках. Далее к полученным значениям высот 13 точек (8 — на границах, 1 — в центре и 4 — полученные экстраполяцией) прибавляются случайные гауссовые числа $\xi(n = 1)$.

Описанная процедура повторяется в последующих циклах. При этом увеличивается число точек и уменьшается дисперсия случайных чисел. При-

меры поверхностей, полученных с помощью этого алгоритма, приведены на рис. 1 (см. четвертую страницу обложки).

Тестирование методов расчета фрактальной размерности проводилось следующим образом. Генерировался набор поверхностей размером 1025×1025 точек с заданной фрактальной размерностью D . Задаваемая фрактальная размерность варьировалась от 2,05 до 2,95. Из центра вырезался кусок размером 512×512 точек для минимизации влияния границ [7, 12] и рассчитывалась фрактальная размерность $D_{\text{выч}}$ данного участка поверхности. За точность определения фрактальной размерности данным методом бралась разница между вычисленной размерностью $D_{\text{выч}}$ и заданной D . Для улучшения статистики расчет повторялся 40 раз для каждого значения D и усреднялось значение $(D_{\text{выч}} - D)$.

Алгоритмы расчета фрактальной размерности

Озерный алгоритм. Наиболее широко применяемый в настоящее время метод расчета фрактальной размерности СЗМ-изображений — это так называемый "озерный алгоритм", или метод периметр—площадь (area—perimeter method) [5, 7, 14].

При этом методе поверхность рассекается плоскостью на каком-либо фиксированном уровне Z_0 , например $Z_0 = (Z_{\min} + Z_{\max})/2$. Пересечение поверхности с этой плоскостью представляет набор замкнутых линий ("озер") (рис. 2, см. четвертую страницу обложки). Периметр L каждого озера связан с его площадью соотношением [14]

$$L(\delta) = \alpha F_d' A^{(F_d - 1)/2}, \quad (2)$$

где α — константа; F_d' — фрактальная размерность береговой линии; δ — единица измерения длины.

На основании выражения (2) F_d' находят по наклону зависимости логарифма периметра от логарифма площади сечения зерен.

Как показало тестирование, данный метод не является надежным (рис. 3, а). На поверхностях с малой фрактальной размерностью D он дает завышенное значение фрактальной размерности $D_{\text{выч}}$, причем результаты вычислений имеют сильный разброс по значениям. Это связано с тем, что на поверхностях с низкой фрактальной размерностью формируется мало зерен и точный расчет данным методом затруднен.

Несколько улучшить ситуацию помогает рассмотрение нескольких сечений (в данном случае 100) от Z_{\min} до Z_{\max} . Площадь и периметр всех зерен наносятся на единый график зависимости периметра от площади. При этом значительно уменьшается разброс результатов, а также повышается

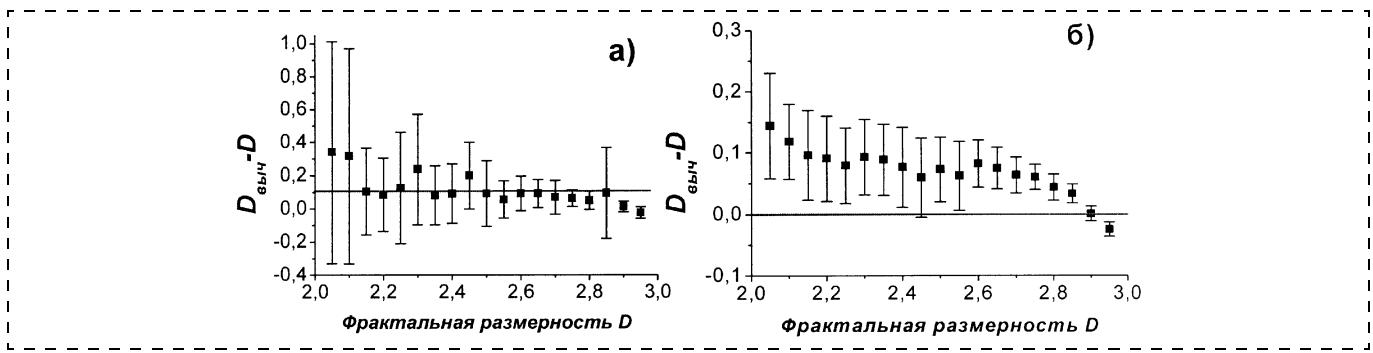


Рис. 3. Разница между фракタルной размерностью $D_{\text{выч}}$, рассчитанной озерным алгоритмом, и заданной D :

а — при сечении поверхности на фиксированном уровне $Z_0 = (Z_{\min} + Z_{\max})/2$; *б* — при сечении поверхности 100 уровнями от Z_{\min} до Z_{\max}

точность расчета фракタルной размерности данным методом: среднее завышение значения фракタルной размерности на гладких поверхностях не превышает 0,15 (рис. 3, *б*).

Модифицированный метод подсчета клеток. Для расчета фракタルной размерности профиля часто применяют метод подсчета клеток (box-counting method) [6, 7]. Фракタルную размерность поверхности можно рассчитать по размерности ее профиля путем добавления единицы. Как правило, профиль получают путем рассечения исследуемой поверхности и плоскости $x = \text{const}$ (направление быстрого сканирования) или $y = \text{const}$.

В данной работе мы попробовали скомбинировать метод подсчета клеток и озерный алгоритм. Суть данного подхода в следующем: при сечении поверхности плоскостью $Z_0 = (Z_{\min} + Z_{\max})/2$ получается набор односвязанных областей и уже к их границам применяется метод подсчета клеток (см. рис. 2 на четвертой стороне обложки).

Вся топограмма покрывается квадратными ячейками со стороной δ и подсчитывается число непустых ячеек. Затем уменьшается размер ячеек и снова проводится подсчет непустых ячеек. Продолжая проделывать описанную процедуру, мы получаем зависимость числа непустых ячеек $N(\delta)$ от их размера δ . По наклону зависимости N от δ в двойном логарифмическом масштабе определяется фракタルная размерность. Примерно такой же метод применял Мандельброт для расчета фракタルной размерности побережья Норвегии [7], но для анализа СЗМ-данных он широкого распространения не получил.

Несмотря на свою простоту, данный метод показал хорошие результаты (рис. 4, *а*). При небольшом разбросе результатов среднее завышение фракタルной размерности у данного метода не превосходит 0,15, т. е. данный метод не уступает в точности озерному алгоритму со 100 сечениями, но при этом работает быстрее. Более того, так как в данном методе не используются точные данные о высотах то-

чек на поверхности (они могут быть, например, в относительных единицах), то этот метод может быть применен для расчета фракタルной размерности по данным оптической микроскопии, например, для анализа фракタルной размерности границ среза, колоний бактерий и т. д.

Дисперсионный метод. При расчете фракタルной размерности дисперсионным методом (variance method) исследуется среднее квадратическое отклонение высоты поверхности при разных размерах участка поверхности. Поверхность делится на квадратные ячейки (так же, как и в модифицированном методе подсчета клеток, описанном выше) и рассчитывается усредненное по всей площади поверхности среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma^2 = \left\langle \frac{1}{B^2 - 1} \sum_{i=1}^{B^2} (Z_i - \bar{Z})^2 \right\rangle, \quad (3)$$

где B^2 — число точек в данной ячейке; Z_i — высота точек; \bar{Z} — средняя высота в ячейке; $\langle \rangle$ — означает усреднение по всей площади поверхности.

Фракタルная размерность рассчитывается из соотношения между дисперсией и размером ячейки [12, 15]:

$$\sigma^2(B) \propto B^{2(3-D)}. \quad (4)$$

Данный метод проявил себя с лучшей стороны (рис. 4, *б*). При небольшом завышении значения фракタルной размерности на гладких поверхностях (менее 0,2) данный метод имеет наименьший разброс результатов из всех методов, протестированных в данной работе. Именно его мы бы рекомендовали для расчета фракタルной размерности СЗМ-изображений.

Метод корреляционной функции. Обширную информацию о процессе роста можно получить, определяя так называемые характеристические показатели рельефа поверхности (critical exponents) [16]. Показатель шероховатости рельефа α , характеризующий изменение шероховатости интерфей-

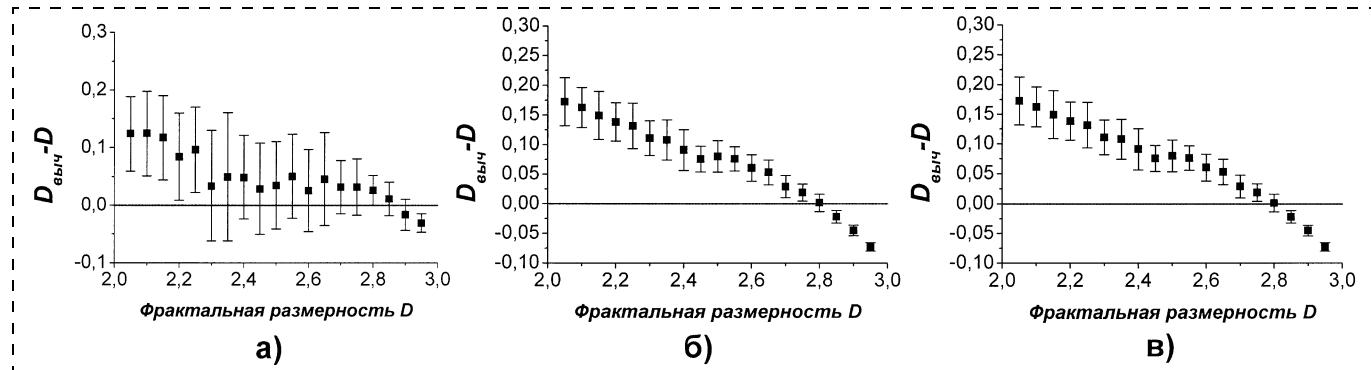


Рис. 4. Разница между фрактальной размерностью $D_{\text{выч}}$, рассчитанной различными методами, и заданной D :
а — модифицированный метод подсчета клеток; б — дисперсионный метод; в — метод корреляционной функции

са системы в зависимости от масштаба, можно определить из разностно-высотной корреляционной функции (height-height correlation function):

$$C(l) = [\langle (h(x) - h(x'))^2 \rangle_x]^{1/2}, \quad (5)$$

где $l = |x - x'|$, а усреднение проводится по всей площади скана.

При малых длинах корреляции [16]

$$C(l) \sim l^\alpha, \quad (6)$$

откуда и можно определить α .

Фрактальная размерность D и показатель шероховатости α связаны соотношением [16]

$$D = 3 - \alpha. \quad (7)$$

Именно на соотношении (7) основан данный способ определения фрактальной размерности.

Этот метод дает минимальный разброс результатов и хорошую точность на поверхностях, с фрактальной размерностью, большей 2,3—2,4 (рис. 4, а, в). На гладких же поверхностях (с небольшой фрактальной размерностью) значение фрактальной размерности оказывается сильно завышенным. Мы это связываем с несправедливостью соотношения (7) для гладких поверхностей с большой длиной корреляции.

Заключение

Таким образом, используя параметр фрактальной размерности для характеристики геометрии поверхности, следует быть внимательным при выборе метода ее расчета. Как показано в данной статье, наиболее точными методами являются озерный алгоритм с использованием нескольких сечений (ошибка менее 0,2), модифицированный метод подсчета клеток (ошибка менее 0,1) и метод разностно-высотной корреляционной функции (ошибка менее 0,1). Последний метод неприменим к гладким поверхностям с маленькой фрактальной размерностью.

Список литературы

- Биннинг Г., Рорер Г. Сканирующая тунNELьная микроскопия — от рождения к юности // Нобелевские лекции по физике — 1986. УФН. 1988. Т. 154. Вып. 2. 261 с.
- Binning G., Quate C. F., Gerber Ch. Atomic force microscopy // Phys. Rev. Lett. 56 (9). 1986. P. 930—933.
- Арутюнов П. А., Толстихина А. Л. Феноменологическое описание характеристик поверхности, измеряемых методом атомно-силовой микроскопии // Кристаллография. 1998. Т. 43. № 3. С. 524—534.
- Арутюнов П. А., Толстихина А. Л., Демидов В. Н. Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1999. Т. 65. № 9. С. 27—37.
- Chesters S., Wong H. G., Kasper G. A fractal-based method for describing surface roughness and texture // Proc. of Institute of Environmental Sciences. 1990. P. 316.
- Provder T., Kunz B. Application of profilometry and fractal analysis to the characterization of coating surface roughness // Progress in Organic Coatings. 1996. V. 27. N 1—4. P. 219—226.
- Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 256 с.
- Павлов Д. А., Хохлов А. Ф., Шиляев П. А., Шенгурев Д. В., Шенгурев В. Г. Фрактальность поверхности пленок аморфного,nano-, микро- и поликристаллического кремния // Поверхность. 2001. № 7. С. 107—112.
- Pavlov D. A., Khokhlov A. F., Shengurov V. G., Shilyaev P. A. Correlation between fractal dimension and properties of polycrystalline Si surface // Physics of low dimensional structures. 2002. V. 5/6. P. 147—152.
- Шиляев П. А., Павлов Д. А., Хохлов А. Ф., Шенгурев В. Г. Связь фрактальной размерности и свойств поверхности поликристаллического кремния // Микросистемная техника. 2003. № 6. С. 10—12.
- Тихов С. В., Павлов Д. А., Шиляев П. А., Шоболов Е. Л., Оськин А. А. Увеличение чувствительности к водороду кремниевого диода Шоттки путем модификации микрорельефа полупроводника // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 9. С. 1—5.
- Almqvist N. Fractal analysis of scanning probe microscopy images // Surface Science. 1996. V. 355. N 1—3. P. 221—228.
- Voss R. F. Random fractal forgeries // Fundamental Algorithms in Computer Graphics (ed. R. A. Earnshaw). Springer-Verlag, Berlin. 1985. P. 805—835.
- Gomez-Rodriguez J. M., Baro A. M., Salvarezza R. C. Fractal characterization of gold deposits by scanning tunneling microscopy // Vac. Sci. Technol. B. 1991. V. 9. N 2. P. 495—499.
- Oden P. I., Majumdar A., Bhushan B., Padmanabhan A., Graham J. J. AFM Imaging, Roughness Analysis and Contact Mechanics of Magnetic-Tape and Head Surfaces // J. Tribol. 1992. V. 114. P. 666—674.
- Barabasi A.-L., Stanley H. E. Fractal concepts in surface growth. Cambridge: University Press. 1995. 366 p.

УДК 535.82

К. П. Гайкович, д-р физ.-мат. наук,
В. Ф. Дряхлушкин, канд. физ.-мат. наук,
Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БЛИЖНЕПОЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА*

Представлены результаты исследования структуры ближнего поля полупроводникового лазера по данным сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ). Достигнутое высокое разрешение позволило зарегистрировать тонкую наномасштабную структуру неоднородностей излучения, которая может быть обусловлена наномасштабными неоднородностями излучающей поверхности лазера. Разрешающая способность системы СБОМ, определяемая эффективным размером апертуры зонда, составляла ~50–100 нм, т. е. много меньше рабочей длины волны. Дальнейшее увеличение разрешения (до 20–30 нм) достигалось путем учета формы аппаратной функции с помощью деконволюции получаемых двумерных изображений методом Тихонова. Обнаруженные в результате анализа вариации излучения с амплитудой 3–4 % имели характерный размер ~50 нм и форму, близкую к форме неоднородностей излучающей поверхности лазера, наблюдавшихся одновременно с помощью атомно-силового микроскопа.

Введение

По сравнению с ранее опубликованными работами [1–3] по исследованию излучения полупроводникового лазера системами сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ) выполненный в данной работе анализ позволил достичь более высокого разрешения и четко различить наномасштабные неоднородности ближнего поля лазера. В системе СБОМ использовался зонд [4], обеспечивающий разрешающую способность ~50–100 нм. При внимательном анализе получаемых ближнепольных изображений излучения лазера можно видеть наличие небольших (сопоставимых с эффективным размером апертуры зонда) неоднородностей структуры, истинные размеры которых неизбежно сглаживаются на масштабе передаточной функции зонда, а амплитуда — соответственно уменьшается.

Для восстановления истинной структуры ближнего поля излучения лазера был использован разработанный нами метод учета передаточной функции зонда [5], основанный на деконволюции изображения в рамках теории некорректных задач Тихонова [6]. В этих работах восстанавливалась структура наномасштабных неоднородностей протравленной поверхности ванадиевой пленки, а форма передаточной функции определялась по отклику на наименьшие детали структуры в самом анализируемом изображении.

Задача восстановления изображения.

Анализ передаточной функции

Как было показано в [5], измеряемое методом СБОМ двумерное распределение (изображение) связано с истинным (по крайней мере, приблизительно) уравнением двумерной свертки:

$$z_m^\delta(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(x - s, y - t) \times z(s, t) ds dt, \quad (1)$$

где ядро $K(w, W)$ — передаточная функция; $z_m^\delta(x, y)$ — измеренный сигнал; $z(s, t)$ — искомое истинное изображение (изображение, которое было бы измерено прибором с δ-образной передаточной функцией K в (1)).

Приближенное решение (1) относительно $z(s, t)$ позволяет восстановить изображение с более высокой разрешающей способностью.

В [5] этот метод был использован для восстановления изображений в СБОМ. В СБОМ разрешение микроскопа и мощность его оптического излучения определяет размер апертуры зонда, который составлял 50–100 нм, т. е. много меньше длины волны света. Размер апертуры определяет и эффективную полуширину передаточной функции (ядра K) в (1), которую нам необходимо знать, чтобы решить уравнение. В [5] был предложен метод определения передаточной функции зонда, который реализуем в случаях, когда в пространственном спектре неоднородностей исследуемой поверхности (или соответствующей тестовой структуры) имеются неоднородности, много меньшие, чем размер апертуры. Такие неоднородности могут рассматриваться как δ-функции, т. е. $z(x, y) = \delta(x, y)$, и мы имеем из (1)

$$z_m^\delta(x, y) = K(x, y).$$

Критерий наличия таких маленьких структур на исследуемой поверхности весьма прост: все наименьшие детали изображения должны быть одинаковыми и повторять форму передаточной функции зонда $K(x, y)$. Анализ таких наименьших деталей для исследованной в [5] тонкой протравленной ванадиевой пленки показал, что соответствующая передаточная функция хорошо аппроксимируется двумерным гауссовым распределением:

*Работа выполнена при поддержке INTEL и РФФИ (грант № 03-02-17321).

$$K(x, y) = \frac{4}{\pi \sigma_x \sigma_y} \times \\ \times \exp \left[-4 \left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right) \right] \quad (2)$$

с параметрами $\sigma_x = \sigma_y = \sigma \approx 20$ пикселей = 66 нм. Это значение σ характеризует как разрешающую способность, реализованную в исходном СБОМ-изображении, так и дает оценку сверху размера апертуры использованного в измерениях зонда $D \leq 66$ нм.

Для восстановления истинной структуры изображения частично протравленной тонкой ванадиевой пленки (< 10 нм) на кварцевой подложке в [5] использовался метод, основанный на деконволюции изображения Тихонова [6]. В результате достигнутое разрешение, оцененное по аппроксимации с помощью (2) наименьших деталей на восстановленном изображении, составило около 20 нм.

Метод деконволюции

Уравнение (1) является интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода. Известно, что решение уравнений этого типа представляет собой некорректную задачу, требующую применения методов регуляризации, основанных на использовании дополнительной (априорной) информации о точном решении. Если использовать информацию о принадлежности решения к классу интегрируемых с квадратом функций, имеющих интегрируемую с квадратом производную, приближенное решение (1) z^α может быть найдено методом обобщенной невязки Тихонова. Предполагается, что известна оценка интегральной ошибки измерений δ и мера погрешности h приближенно известного оператора K_h , которые удовлетворяют условиям

$$\|z_m - z_m^\delta\|_{L_2} \leq \delta; \\ \|K - K_h\|_{W_2^2 \rightarrow L_2} \leq h, \quad (3)$$

где z_m — левая часть (1), соответствующая точному решению; z_m^δ — данные измерений с ошибкой δ . Согласно методу Тихонова, приближенное решение (1) находится из условия минимума функционала обобщенной невязки

$$M_\alpha[z^\alpha] = \|K_h z^\alpha - z_m^\delta\|_{L_2}^2 + \\ + \alpha \|z^\alpha\|_{W_2^2}^2 \quad (4)$$

при дополнительном условии, которое выражает принцип обобщенной невязки и позволяет найти значение параметра регуляризации α при заданном уровне погрешностей измерений и оператора:

$$\|K_h z^\alpha - z_m^\delta\|_{L_2}^2 = \\ = (\delta + h \|z^\alpha\|_{W_2^2}^2)^2. \quad (5)$$

Для решения двумерных задач с большой размерностью используются свойства преобразования Фурье:

$$z^\alpha(s, t) = \frac{1}{4\pi^2} \times \\ \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tilde{K}_h^*(\omega, \Omega) \tilde{z}_m^*(\omega, \Omega) e^{i(\omega s + \Omega t)} d\omega d\Omega}{L(\omega, \Omega) + \alpha [1 + (\omega^2 + \Omega^2)^2]}, \quad (6)$$

где $\tilde{K}_h^*(\omega, \Omega) = \tilde{K}_h(-\omega, -\Omega)$;

$$L(\omega, \Omega) = |\tilde{K}_h(\omega, \Omega)|; \\ \tilde{z}_m^*(\omega, \Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} z_m^\delta(x, y) \times \\ \times e^{-i(\omega x + \Omega y)} dx dy; \quad (7)$$

$$\tilde{K}_h(\omega, \Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K_h(u, w) \times \\ \times e^{-i(\omega u + \Omega w)} du dw. \quad (8)$$

Эти формулы позволяют решить проблему быстрых вычислений на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье.

Численное моделирование

В данной работе этот метод деконволюции использовался для восстановления структуры ближнего поля излучения лазера. Важным преимуществом рассматриваемого метода является сходимость получаемого приближенного решения к точному в метрике W_2^2 , и, следовательно, равномерная сходимость (т. е. по максимуму модуля) по мере уменьшения погрешности измерений в интегральной (!) метрике [6]. Значения параметров погрешности измерений δ и h (оцененные в метрике L_2) определяют качество восстановления, неявно регулируя параметр регуляризации, от которого зависит степень заглаживания приближенного решения. При $(\delta, h) \rightarrow 0$ восстановленное распределение равномерно сходится к истинному. Поэтому нет необходимости использовать большие статистические ансамбли для получения представительных оценок точности восстановления.

— | ления, как это требуется в | других методах, обладающих | интегральной или средней | квадратической сходимо- | стью — достаточно выполнить | численное моделирова- | ние для типичных и, может | быть, экстремальных распре- | делений.

Известно, что точность восстановления для некорректных задач может быть оценена только на основе результатов численного моделирования по замкнутой схеме: задается исходное распределение, по нему вычисляются точная левая часть (1), на нее "набрасывается" случайная погрешность, чтобы получить "данные измерений", уравнение (1) решается и результаты восстановления сравниваются с исходным распределением. Результаты такого численного моделирования для исходных структур, аналогичных исследованным в [5] пленкам, представлены на рис. 1–3.

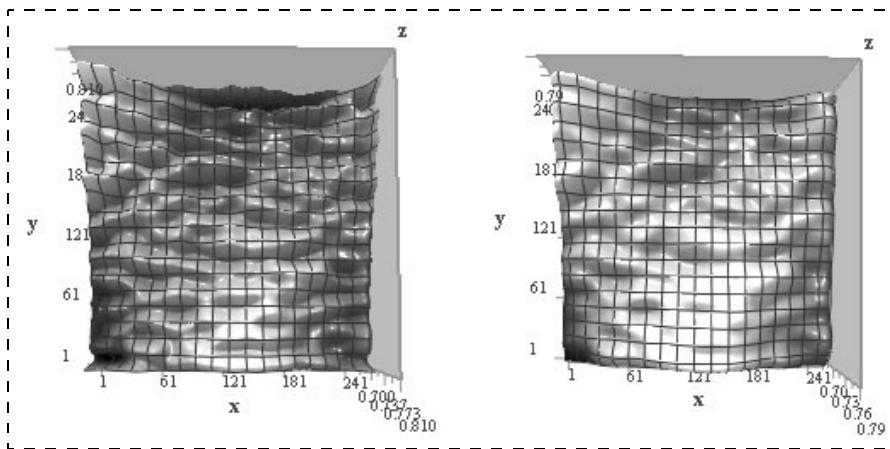


Рис. 1. Численное моделирование: исходное изображение $z(x, y)$ (слева) и вычисленные "данные измерений" $z_m(x, y)$ в (I) (справа)

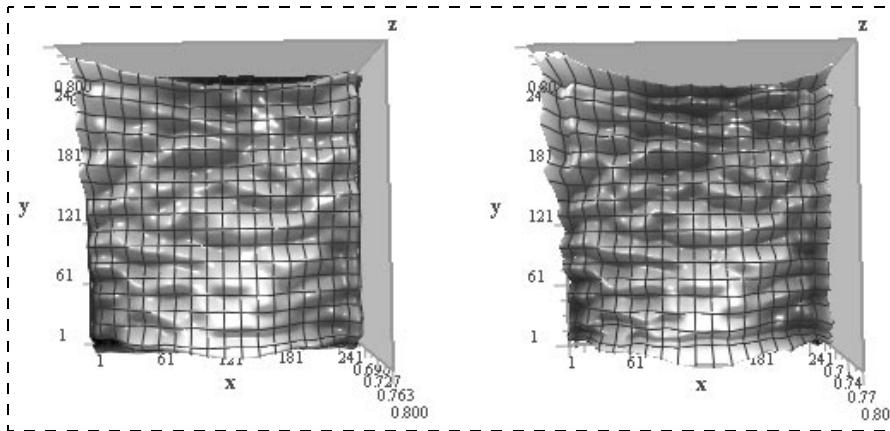


Рис. 2. Результаты восстановления по "данным измерений" на рис. 1 при моделируемой погрешности, равной реальной погрешности СБОМ (слева) и при уменьшении погрешности в 4 раза (справа)

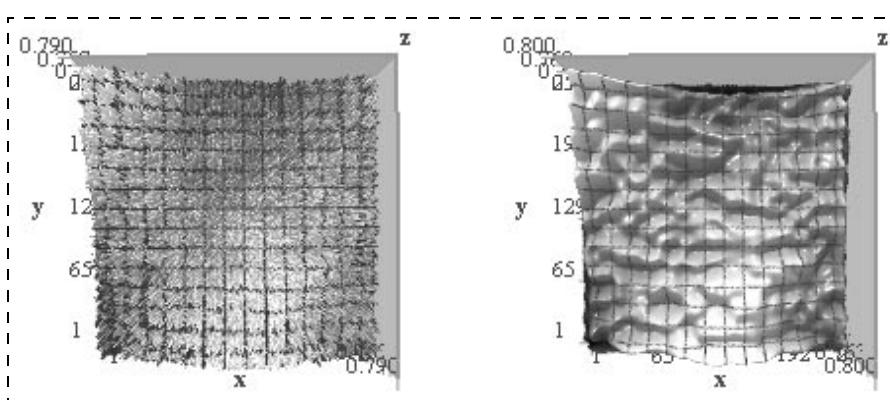


Рис. 3. "Данные измерений" с большим уровнем случайной ошибки (слева) и результаты восстановления (справа)

На рис. 2 можно видеть, что при реализуемой точности измерений разрешение увеличивается, а при дальнейшем уменьшении ошибки решение сходится к точному. Это иллюстрирует воз-

можность преодоления предела разрешения СБОМ, связанного со сглаживающим свойством передаточной функции зонда. На рис. 3 показано, что при высоком уровне шумов, которые полностью

замывают изображение, в результате применения разработанного метода деконволюции оказывается возможным получить качественное восстановление.

Измерения и обработка СБОМ-изображений ближнего поля лазера

Используя деконволюцию СБОМ-изображений, было исследовано ближнепольное излучение полупроводникового лазера с токовым порогом 0,5 А и квантовым выходом 27 % при мощности 0,2 Вт на рабочей длине волны $\lambda = 961$ нм. Схема лазера представлена на рис. 4. Ширина активной области лазера составляла 100 нм. Распределение ближнего поля (расстояние зонда до поверхности ~5 нм) излучения во всей ширине излучающей области, измеренное с помощью системы СБОМ, показано на рис. 5. Можно видеть, что неоднородности распределения имеют характерный размер, сравнимый с размером апертуры зонда, и можно полагать, что истинные неоднородности ближнего поля имеют меньшие характерные размеры и большую амплитуду, чем на СБОМ-изображении. На рис. 6

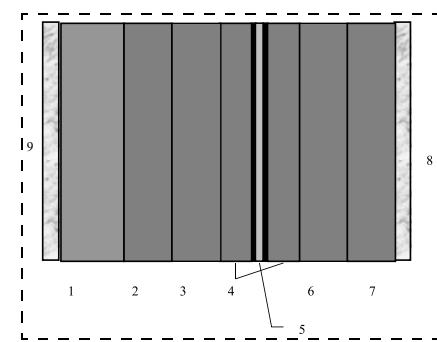


Рис. 4. Структура лазера:

1 — подложка n^+ -GaAs; 2 — буферный слой GaAs (550 нм); 3 — пограничный слой n -InGaP (500 нм); 4 — волноводные слои GaAs (300 нм); 5 — активная область, состоящая из двух квантовых ям InAs (8 нм) и разделяющего слоя GaAs (80 нм); 6 — пограничный слой p -InGaP (500 нм); 7 — контактный слой p^+ -GaAs; 8, 9 — омические Au контакты к n - и p -типам GaAs соответственно

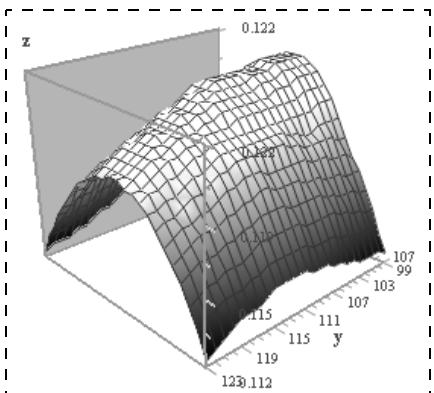


Рис. 5. Измеренное системой СБОМ ближнее поле излучения полупроводникового лазера

(слева) показано ближнепольное СБОМ-изображение на площади меньшего размера, чем на рис. 5. При этом неоднородности в излучении становятся практически незаметными. Восстановленное распределение излучения можно видеть на рис. 6 (справа). Вариации излучения на восстановленном изображении проявляются гораздо отчетливее и составляют 3–4 % среднего уровня. Их размер примерно 50 нм и они, скорее всего, связаны с наномасштабными неоднородностями излучающей поверхности лазера, измеренными с помощью атомно-силового микроскопа и показанными на рис. 7. Сравнение с рис. 6 (справа) показывает, что форма неоднородностей рельефа поверхности в основных деталях подобна форме неоднородностей, восстановленных в СБОМ-изображении ближнепольного лазера.

Заключение

В работе представлены результаты анализа СБОМ-изображений

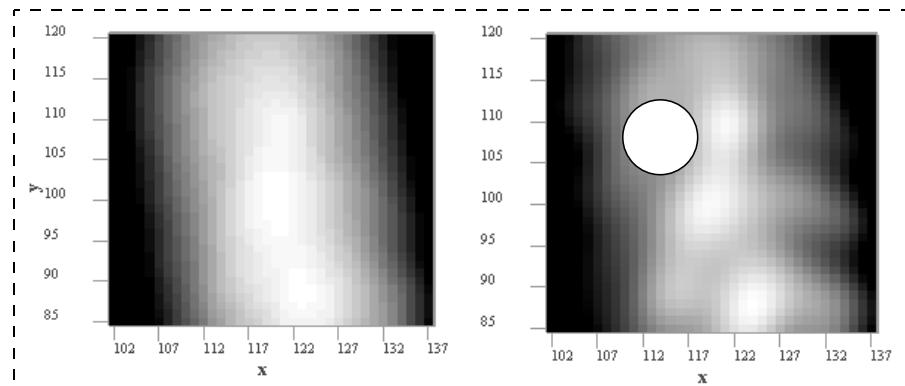


Рис. 6. Измеренное (слева) и восстановленное (справа) изображения ближнего поля излучения лазера. Кружок — размер апертуры зонда. Размер пикселя 10 нм

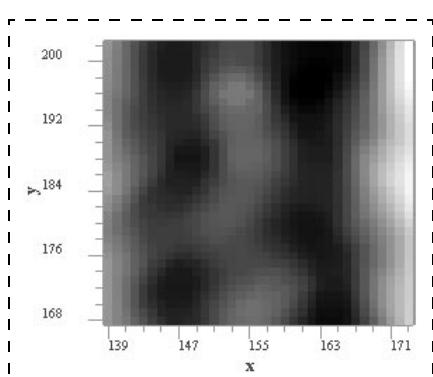


Рис. 7. Рельеф излучающей поверхности лазера, измеренный с помощью атомно-силового микроскопа. Размер пикселя 4,3 нм

ближнепольного поля излучения полупроводникового лазера, показавшие наличие более тонкой пространственной структуры, подобной наблюдаемой структуре неоднородностей рельефа излучающей поверхности лазера, измеренной с помощью атомно-силового микроскопа. При анализе изображений для увеличения разрешающей способности использовался метод деконволюции Тихонова с учетом передаточной функции зонда.

Список литературы

1. Kim J., Boyd J. T., Jackson H. E., Choquette K. D. Near-field spectroscopy of selectively oxidized vertical cavity surface emitting lasers // Applied Physics Letters. 2000. Vol. 76. N 5. P. 526–528.
2. Young D. K., Mack M. P., Abare A. C. and al. Near-field scanning optical microscopy of indium gallium nitride multiple-quantum-well laser diodes // Applied Physics Letters. 1999. Vol. 74. N 16. P. 2349–2351.
3. Kim J., Pride D. E., Boyd J. T., and Jackson H. E. Spectrally-resolved near-field investigations of photon implanted vertical cavity surface emitting lasers // Applied Physics Letters. 1998. Vol. 72. N 24. P. 3112–3114.
4. Dryakhlyushin V. F., Klimov A. Yu., Rogov V. V., and Gusev S. A. A probe for near-field scanning microscope // Instruments and experimental techniques. 1998. Vol. 41. N 2. P. 275–276.
5. Гайкович К. П., Дряхлушкин В. Ф., Жилин А. В. Улучшение разрешающей способности СБОМ-изображений на основе учета передаточной функции зонда // Микросистемная техника. 2003. № 7. С. 19–21.
6. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягода А. Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983. 200 с.


Страница РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1998 г. Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 6 за 1998 г. <http://intra.rfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Пластичность металлов: модели гетерогенных сред с микроструктурой

Номер проекта: 98-01-00125

Год представления отчета: 2001

При развитых пластических деформациях в объеме металлического кристаллического агрегата образуется фрагментированная субзеренная структура. Равновесие материала в некоторой области с однородно ориентированной кристаллической решеткой становится неустойчивым, и эта область разбивается на подобласти с различной ориентацией решетки. Предложены уравнения, описывающие явление. Рассмотрены кристаллы, единственным механизмом пластической деформации которых является множественное кристаллографическое скольжение. Элемент среды трактуется в духе континуума Коссера как материальный объем, снабженный ориентацией решетки. Записаны определяющие соотношения активного продолжения процесса и уравнения равновесия в скоростях в терминах текущего Лагранжева подхода. В качестве уравнения для спина решетки записано уравнение равновесия моментов. Модель геометрически нелинейна и содержит механизм поворота анизотропного материального элемента, дестабилизирующий процесс деформирования. Для изучения устойчивости построенной циркуляционной системы использован динамический подход. Неконсервативность является следствием использования решеточной, а не яуманновой, коротационной производной. Найдена точка бифуркации при одноосном сжатии плоского неограниченного однородного монокристаллического тела с кубической симметрией свойств, за которой немедленно происходит потеря устойчивости типа дивергенции с образованием ячеистой структуры. При переходе из любой ячейки в соседнюю спин решетки меняет свой знак, что позволяет считать данные ячейки зародышами субзерен. При фиксированных модулях упрочнения и надкритическом напряжении размер ячеек растет с увеличением изгибной жесткости решетки. Полученные результаты представляются новыми и не имеющими мировых аналогов. Построена и изучена клеточно-автоматная модель самоорганизации дислокаций

под действием непропорционального циклического нагружения, учитывающая расщепленность дислокации, зависимость от энергии дефекта упаковки кристаллической решетки и образование дислокационных барьеров при взаимодействии систем скольжения. Модель предназначалась для проверки гипотезы о механизме эффекта дополнительного упрочнения при непропорциональном циклическом нагружении металлов с низкой энергией дефекта упаковки, согласно которому дислокационные барьеры управляют размером ячеистой структуры (т. е. упрочнением). Обнаружен существенный недостаток модели, не позволяющий адекватно учитывать короткодействующие реакции и делающий неустойчивыми дипольные и другие дислокационные структуры в процессе циклического нагружения и не позволивший проверить гипотезу. Протестирован предложенный математиками алгоритм построения иерархических функциональных базисов на отрезке. Получена хорошая сходимость решения линейных краевых задач на всем отрезке.

Исследование индуцированных синхротронным излучением хемосорбционных процессов на поверхностях полупроводников при синтезе слоистых микроструктур

Номер проекта: 98-02-17259

Год представления отчета: 2001

Определены основные закономерности процессов формирования межфазных границ раздела полупроводник — диэлектрик. Для этого использована двухмодульная высоковакуумная установка, позволяющая осуществить замкнутый технологический микроцикл, включающий очистку поверхности, осаждение функционального слоя и *in situ* исследования поверхности подложки методом рентгено-фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Интегрированные в пространстве и времени технологические процессы газофазной очистки исходных пластин и осаждения функциональных слоев проводились при УФ-излучении спектрального диапазона 115—265 нм, что позволило снизить рабочие

температуры на 200–300 К, а также увеличить скорость молекулярного наслаждания (МН) до теоретически предельных значений. Исследованные газофазные фотонно-индуцированные процессы осуществлялись в камере с низким остаточным давлением газов, что позволило получать и сохранять определенное время практически атомарно-чистую поверхность (уровень очистки от углерод- и кислородсодержащих примесей определялся в пределах 0,1 монослоя), а также изучить начальные стадии процесса формирования границ раздела. Механизм фотостимулированного роста ZnS, так же как и SiO₂, на кристаллические полупроводники соответствует модели Франка — ван дер Мерве (послойный рост пленки). На основании полученных экспериментальных данных введено понятие структурной единицы твердого вещества (СЕТВ) и обнаружена зависимость числа дефектов на границах раздела формируемых тонкопленочных структур от соотношения размеров СЕТВ и молекул реакционных газов, участвующих в хемосорбционных процессах. Установлено, что основные закономерности формирования границ раздела кристаллический полупроводник — диэлектрик могут быть использованы для создания квазипериодической структуры на поверхности некристаллического полимера в виде углеродных кластеров размерами 7–12 нм. Формирование таких поверхностей перспективно для медицинского материаловедения.

Формирование упорядоченных систем нанокластеров на ступенчатых поверхностях кремния для реализации одноэлектронных эффектов при высокой температуре

Номер проекта: 98-02-17831

Год представления отчета: 2001

При выполнении проекта была получена количественная и качественная информация о процессах взаимодействия атомов кремния, германия и металлов с моноатомными ступенями и их эшелонами на поверхностях кремния (111) и (100). Были определены условия зарождения кластеров адсорбатов на моноатомных ступенях и условия перехода к двумерному зарождению на террасах между ступенями. Определены условия перехода от формирования доменов примесно-индуцированных структур к формированию кластеров германия и металлов нанометровых размеров. Показана принципиальная возможность управления процессом формирования кластеров нанометровых размеров на моноатомных ступенях и эшелонах моноатомных ступеней. Проведено исследование процессов самоорганизации кластеров металла (золота) на поверхности кремния (111) со специально сформированной системой эшелонов моноатомных ступеней методом сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии. Получены количественные данные о процессах взаимодействия атомов золота с моноатомными ступенями и их эшелонами. Экспериментально показана возможность формирования упорядоченных квазипериодиче-

ских цепочек нанокластеров золота вдоль верхних ребер эшелонов моноатомных ступеней. Показана принципиальная возможность управления размером и периодичностью кластеров нанометровых размеров на эшелонах моноатомных ступеней, что открывает пути формирования одноэлектронных элементов на эффекте кулоновской блокады, способных работать при повышенной температуре (вплоть до комнатной). Были созданы латеральные туннельные емкости путем разрыва металлической нанопроволоки ступенью, предварительно созданной на диэлектрической подложке, и исследованы латеральные туннельные переходы. Изучен эффект кулоновской блокады в одноэлектронном транзисторе с нелинейными туннельными переходами.

Электронные свойства и фазовые переходы типа металл — изолятор на поверхности полупроводников Si, SiC, GaAs, GaN при адсорбции металлов

Номер проекта: 98-02-18265

Год представления отчета: 2001

Выполнены комплексные экспериментальные и теоретические исследования электронных свойств и атомной структуры поверхности полупроводников: Si(100)2 × 1, Si(111)7 × 7, GaAs(100)Ga-rich (обогащенная Ga), GaAs(100)As-rich (обогащенная As), SiC(0001), GaN (0001) и границ раздела полупроводник — металл при адсорбции K, Cs и Ba на ряд указанных поверхностей. Использованы современные методы — AFM, STM, спектроскопии Оже и фотоотражения, а также оригинальный метод пороговой фотоэмиссионной спектроскопии в сверхвысоком вакууме. Разработан и применен новый метод исследования поверхностных плазмонов и возбуждений в квази2D кластерах по спектрам фотоэмиссии при резонансном возбуждении поляризованным светом. Поверхностные и интерфейсные плазмоны с энергиями 2,4 и 2,05 эВ обнаружены при монослойных Cs покрытиях на поверхностях Si(100)2 × 1, GaAs(100) Ga-rich, а также возбуждения с энергиями 1,8; 1,9; 2,17 эВ в квази2D Cs кластерах на Ga димерах. Впервые для границ раздела Cs, Ba/Si(100)2 × 1; K, Cs, Ba/Si(111)7 × 7; Cs/GaAs(100) Ga-rich; Cs/GaAs(100) As-rich установлена перестройка электронных 2D спектров, индуцированная адсорбцией, изменение плотности поверхностных состояний, ионизационной энергии как функции покрытия. Установлено, что характер взаимодействий может изменяться в широком диапазоне от ионного Cs/Si(111)7 × 7 до ковалентного Cs, Ba/Si(100)2 × 1. Определен механизм формирования границ раздела Cs/, Ba/Si(100), состоящий в последовательной адсорбции Cs (Ba) на две неэквивалентные позиции в димерных рядах при насыщающем покрытии 1 монослоем. Установлено, что электронные свойства границ раздела на Si (100)2 × 1 определяются в основном свойствами подложки, а электронные свойства границ раздела на Si(111)7 × 7 — свойствами

адсорбата. Для поверхности Si(111)7 × 7 установлены локальные взаимодействия определенных типов активных оборванных связей Si и адатомов K, Cs, а также обнаружены последовательные 2D переходы металл-изолятор — металл.

Проведены теоретические исследования и предложена модель, учитывающая взаимодействие между 6 атомами K (Cs) и 12 оборванными связями Si, что приводит к образованию кластеров в ячейке 7 × 7 благодаря эффекту "Negative-U" и обуславливает переход металл — изолятор при покрытии ~0,2 монослоя. Показано, что следующий фазовый переход изолятор-металл при покрытии ~0,5 монослоя может быть отнесен к 2D переходу Мотта. На примере Si(111)7 × 7 с субмонослями Ва впервые проведены теоретические исследования роли вибронных взаимодействий для квази2D систем. Для K, Na/GaAs(100) Ga-rich при температурах (100—200К) установлено образование метастабильных кластеров и показано, что расчеты в рамках транспортной теории плохо описывают температурную зависимость фотоЭДС. Предложена модель, учитывающая отсутствие термодинамического равновесия между объемом и поверхностью и наличие кластеров. Впервые установлен 2D спектр поверхностных состояний и насыщающее покрытие 0,7 монослоя для границ раздела Cs/GaAs(100) Ga-rich и As-rich. Обнаружено, что данные границы раздела являются полупроводниково-выми вплоть до 1 Cs монослоя. Определено существование двух фаз адсорбции с сильной Cs-Ga (As) связью при покрытиях, меньших насыщающего, и со слабой Cs-Cs связью при покрытиях, больших насыщающего. Впервые установлено, что адсорбция Cs на поверхности GaAs(100) при наличии Ga и As димеров происходит первоначально на Ga димеры, а затем на As димеры.

Природа слабой джозефсоновской связи на кристаллографической границе в пленке Nd_xBa₂Cu₃O_{7-d}

Номер проекта: 98-02-18222

Год представления отчета: 2001

Разработаны и исследованы несколько различных типов биэпитетаксиальных гетероструктур, включающих пленки (Nd, Y)Ba₂Cu₃O_(7-d). Применение эпитетаксиальных прослоек с BaZrO₃ и Y-ZrO₂, обладающих соответственно высокой и низкой химической стабильностью по отношению к купратному сверхпроводнику ($T = 750^{\circ}\text{C}$) позволило исследовать зависимость параметров слабой биэпитетаксиальной джозефсоновской связи от нарушения стехиометрии в приграничной области. За счет высокого качества структуры слоев, составляющих многослойную биэпитетаксиальную гетероструктуру, были получены джозефсоновские контакты с аномально высокими для данного типа слабых связей значениями характеристического напряжениях 20—60 мкВ при 77 К и до 2000 мкВ при 4,2 К. Эффективная емкость сформированного биэпитетаксиального джозефсоновского контакта имела значение порядка

125 фФ/мкм² ($T = 20\text{ K}$). Плотность критического тока 60 кА/см² ($T = 4,2\text{ K}$) для сформированных биэпитетаксиальных контактов в несколько раз превышала имеющиеся в литературе данные для 45-градусных бикристаллических контактов. Оцененная на основе резонанса Фиске лондоновская глубина проникновения в пленке YBa₂Cu₃O_{7-d} в области биэпитетаксиальной границы имела значение 210 нм ($f = 500\text{ ГГц}, T = 20\text{ K}$). В результате проведенного исследования можно утверждать, что параметры биэпитетаксиальных джозефсоновских контактов, как контактов других типов, в значительной степени определяются нарушением стехиометрии в области 45-градусной границы в пленке (Nd,Y)Ba₂Cu₃O_{7-d}.

Алмаз-графитовые гетероструктуры в ионно-имплантированном алмазе и синтетических алмазных пленках

Номер проекта: 98-02-16892

Год представления отчета: 2001

Методом плазмохимического осаждения из смесей CH₄—H₂ в СВЧ разряде синтезированы высококачественные поликристаллические алмазные пластины диаметром до 65 мм и толщиной до 1,5 мм, а также эпитетаксиальные монокристаллические пленки на пластинах природного алмаза с ориентацией (100) и (111). Отработаны методы ионно-лучевой модификации алмаза для создания встроенных в кристаллы или пленки графитизированных слоев. Показано, что, варьируя энергию и дозу ионов, можно получать такие слои с толщиной от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров и глубиной погружения до 1 мкм. Таким образом, продемонстрирована возможность создания на основе кристаллов и пленок алмаза гетероструктур, содержащих слои изолятора, полупроводника и проводника (графита). Показано, что пороговые дозы графитизации алмазных поликристаллических пленок увеличиваются при уменьшении размеров зерна, что приписано стоку радиационно-индукционных вакансий на границы зерен. Обнаружено, что структурные изменения в алмазных пленках при отжиге коррелируют с выходом из алмаза водорода, сконцентрированного на границах зерен. Определены скорости аблиции монокристаллов алмаза под действием импульсов эксимерного KrF-лазера в зависимости от плотности энергии для "чистых" и ионно-имплантированных поверхностей. Отработаны элементы технологии отделения эпитетаксиальных алмазных слоев (мембран), выращиваемых на моно- и поликристаллических алмазных подложках. Реализован режим лавинного пробоя в изолирующем слое алмаза между поверхностью и погруженным графитизированным слоем. Показано, что пороговое поле электронной эмиссии алмазных пленок с поверхностным рельефом в виде массива регулярных пирамид существенно (в 3 раза) уменьшается в результате ионной бомбардировки поверхности. Развиты методы расчета неравновесных тепловых процессов в неоднородных твердотельных структурах, содержащих

слои металла и изолятора. Методом тепловых импульсов показано, что в синтетических алмазных пленках длина свободного пробега акустических фононов с частотой 0,5–1,5 ТГц ограничена размерами зерен (60 мкм для исследованных пленок); высокочастотные фононы (с частотами 20 ТГц) интенсивно рассеиваются на примесях и дефектах, так что распространение фононов носит диффузионный характер.

Светоизлучающие кристаллические кремниевые квантовые точки в аморфной матрице, создаваемые новым методом нестационарного плазмохимического газофазного осаждения

Номер проекта: 98-02-17350

Год представления отчета: 2001

Реализованы различные модификации метода нестационарного плазмохимического газофазного осаждения, позволяющие создавать кремниевые нанокристаллиты в различных матрицах. Разработанная технология дает возможность точно контролировать размеры кремниевых нанокристаллитов и их объемную долю. Показано, что теория протекания успешно объясняет наблюдаемую в эксперименте гигантскую (8–10 порядков) анизотропию (вдоль и поперек слоя) проводимости в синтезированных аморфно-нанокристаллических пленках кремния. В пленках со смешанным аморфно-нанокристаллическим фазовым составом обнаружена и исследована интенсивная видимая (600–1000 нм) фотолюминесценция (ФЛ). Показано, что в синтезированных материалах формируется только одна полоса ФЛ, обусловленная излучательной рекомбинацией носителей заряда, локализованных на интерфейсах нанокристаллитов. Методом фононно-индущированной ФЛ исследована динамика терагерцовых фононов в аморфно-нанокристаллических пленках кремния. Предложен механизм пленения фононов в окрестности кремниевых нанокристаллитов, объясняющий наблюдаемое увеличение времени жизни высокогенергетичных фононов в исследуемых пленках по сравнению с результатами для чисто аморфного кремния. Выполнены синтез и структурный анализ трехмерных композитов опал — нанокристаллический кремний как с прямой (с разными степенями заполнения пор опала кремнием), так и инвертированной структурой. В диапазоне длин волн 400–900 нм измерены спектры зеркального отражения света от ростовых поверхностей (111) синтезированных композитов. Наблюдаемые спектральные особенности изучены теоретически и интерпретированы как проявление фотонной запрещенной зоны в направлении [111], перестраиваемой по положению и ширине в видимом и ближнем инфракрасном спектральном диапазоне. Получены легированные Ег аморфно-нанокристаллические кремниевые пленки, в спектре люминесценции которых обнаружена многокомпонентная штарковская структура. Наблюдение узких и интенсивных компонентов свидетельствует о

том, что ионы эрбия могут формировать высокоупорядоченное локальное окружение (нанокластеры Ег—O—Si) в неупорядоченной структурной сетке аморфного кремния. Развитая технология позволила создать высокодобротные ($Q = 300$) микрорезонаторы с активным слоем из гидрогенизированного кремния, легированного эрбием. В полученных структурах наблюдалось резонансное усиление (на 2 порядка по сравнению с пленкой без резонатора) ФЛ на длине волны 1,54 мкм.

Релаксорное поведение тонких сегнетоэлектрических пленок

Номер проекта: 98-02-18069

Год представления отчета: 2001

Изучена связь степени структурного совершенства эпитаксиальных пленок $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3/(001)\text{MgO}$, $\text{PbTiO}_3/(001)\text{MgO}$ и особенностей их доменного строения, структурных фазовых переходов, рамановских спектров в широком температурном интервале. Рентгенографическими методами исследован процесс перестройки кристаллической структуры при сегнетоэлектрическом фазовом переходе (ФП) в эпитаксиальных пленках $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$. Показано, что при переходе из пара- в сегнетофазу в пленке появляется промежуточная фаза типа стеклодипольной, индуцированная дислокациями при температурах, превышающих температуру ФП. Исследованы рамановские спектры тонких пленок $\text{PbTiO}_3/(001)\text{MgO}$, $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3/(001)\text{MgO}$, $\text{BaTiO}_3/(001)\text{MgO}$. Отличия их спектров от спектров объемных материалов "классических" сегнетоэлектриков того же состава связаны с термоупругими напряжениями в пленках, неоднородным распределением точечных дефектов в них вдоль нормали к подложке, дислокациями и обусловленными ими микродеформациями. Установлен переход в низкотемпературную фазу, которая в условиях двусостого сжатия пленки подложкой является моноклинной. Изучены процессы накопления объемного заряда в пленках $(\text{Pb}, \text{Zr})\text{TiO}_3$, нанесенных на подложки из платины и коррозионно-стойкой стали, обусловленные инжекцией носителей из электродов и захватом их на ловушки. Установлен механизм возникновения низкочастотной дисперсии емкости пленок — процесс релаксации пространственно-го заряда. Обнаружены два пика токов термостимулированной деполяризации — один из них связан с распадом сложных комплексов дефектов (димеров), второй, соответствующий более высокой температуре, связан с опустошением ловушек, обусловленных отдельными точечными дефектами. Показано, что один из механизмов накопления объемного заряда в пленках связан с выпрямляющими свойствами kontaktов. Исследования электронной эмиссии позволили выявить вклад в эмиссионный ток "диэлектрической составляющей поляризованности" пленки на низких частотах возбуждающего синусоидального напряжения (100 Гц). Рост диэлектрической проницаемости и ее дисперсия в указанной области частот обусловлены высоким значением этого компонента. В рамках термодинамического

подхода с использованием термодинамического потенциала как функции поляризации, деформации и температуры с учетом энергии термического расширения пленки построена фазовая диаграмма для пленки BaTiO₃, выращенной эпитаксиально на (001) срезе кубического кристалла-подложки, в координатах температура — коэффициент линейного расширения подложки. Полученные результаты согласуются с экспериментами. В приближении эффективного поля рассмотрены ФП в кубическом упругоизотропном сегнетоэлектрике со случайным распределением кольцевых дислокаций. Показано, что переход в сегнетофазу предшествует переход в фазу дипольного стекла. Исследована термодинамика стекольных фаз в разбавленных магнетиках и сегнетоэлектриках типа порядок—беспорядок. Описаны термодинамические свойства всех неоднородных метастабильных состояний в этих фазах, определены их области устойчивости и точки фазовых переходов между ними в слабых внешних полях. Получены полевые и температурные зависимости термодинамических параметров в field-cooled и zero-field-cooled процессах, рассчитана форма петель гистерезиса. На базе проведенных комплексных экспериментальных и теоретических исследований сегнетоэлектрических пленок с использованием оригинальных методик установлены возможные конкретные механизмы перехода "классического" сегнетоэлектрика в сегнетоэлектрик-релаксор.

Исследование оптических и электронных свойств нанообъектов на поверхности твердого тела с помощью сканирующего микроскопа ближнего оптического поля

Номер проекта: 98-02-17443

Год представления отчета: 2000

Была изучена работа системы обратной связи (включая вибрационный датчик касания, само оптоволокно сканирующей иглы и непосредственно ее острье). Было показано, что кварцевые световоды, используемые для изготовления игл, обладают значительно более высокой термической стабильностью механических параметров. Были оптимизированы режимы для приготовления острий сканирующих игл путем разрыва оптоволокна в точке локального разогрева. Полученные результаты позволяют утверждать, что для изготовления острий сканирующих игл путем вытягивания в точке локального разогрева желательно применять промышленно изготовленные приборы для вытягивания микропипеток, что позволяет получать лучшую воспроизводимость результатов. Начаты работы по заострению волокна путем химического травления. Обнаружено, что данный метод также позволяет получать острия с хорошо воспроизводимой формой и радиусом закругления 30—70 нм при использовании одномодового волокна. Разработаны электронные платы для работы в составе блока управляющей электроники. Использование двуполярного выхода высокого напряжения (вме-

сто однополярного) позволит удвоить диапазон механического сканирования пьезоманипулятора, ограниченный электрической прочностью используемой керамики. Разработанная электронная плата генератора сигнала возбуждения вибрации волокна с встроенным синхронным детектором позволяет контролировать параметры эксперимента программно. Использование цифрового синтезатора частоты и программное задание фазы детектирования существенно повысило стабильность параметров системы. Сканирование с помощью низкотемпературного микроскопа ближнего оптического поля (SNOM) массива квантовых точек (QD), выращенных эпитаксией из молекулярных пучков (MBE) с использованием квазитрехмерного роста (по Странскому—Крастанову) InGaAs на GaAs и InP на GaAs при низких температурах, позволило селектировать отдельные QD в массиве на поверхности. Малая ширина линий и пространственная локализация их источников на поверхности свидетельствуют о применимости методики SNOM к решению спектроскопических задач в условиях неоднородного уширения линий. Была изучена зависимость наблюдаемой ширины линии отдельной QD от температуры. Отсутствие участка линейного роста ширины линии в области значений температуры 2—30 К позволяет сделать предположение о слабой роли акустических фононов в безызлучательной гибели экситонных состояний в QD. Резкое увеличение ширины линий, сопровождаемое падением выхода люминесценции при температурах порядка 30 К свидетельствует о пороговом характере процессов безызлучательного разрушения экситонных состояний. Это позволяет предполагать, что безызлучательная рекомбинация в QD, образованных потенциальной ямой сравнительно малых пространственных размеров и заметной глубины, определяется скорее всего оптическими фононами. Была исследована люминесценция отдельной QD при высоком уровне оптической накачки. При этом кроме экситонного пика, интенсивность которого с ростом накачки насыщается и затем уменьшается, и пика, появляющегося на 3—4 мВ ниже экситонного (как показано коллегами, соответствующего би-экситонной рекомбинации, с теми же коэффициентами зависимости расщепления различных круговых поляризаций, что и экситонный пик), в спектре появляются линии, имеющие противоположное направление сдвига компонентов и описываемые существенно меньшим гиromагнитным коэффициентом. Наблюданное поведение не может быть объяснено в рамках спинового расщепления энергетических зон. Было сделано предположение о наблюдении в эксперименте экситонных состояний с ненулевым вращательным моментом. Наличие более чем одного энергетического уровня для электронов и дырок в QD данного типа (малых пространственных размеров и со сравнительно неглубоким квазипотенциалом) не является общепризнанным фактом, и эксперименты с наблюдением *p*-симметрии волновых функций свидетельствуют о наличии "возбужденных" уровней (основное состояние имеет лишь *s*-симметрию).

CONTENTS

Telets V. A., Negina Yu. S., Orlov A. A. *Manufacturing of 3D-MEMS by the Thermocompression Welding* 2

Three most used methods of the thermocompression welding for silicon wafers and other materials applied in 3D-MEMS devices manufacturing are overviewed.

Katys P. G., Katys G. P. *Laser Projection Display* 7

Destination, design concepts, potentiality and key features of projection displays with the microoptoelectromechanical-systems (MOEMS) are discussed.

Gorlov M. I., Andreev A. V. *The Sensor in Gauges of Damp Inside IC Packages* 12

In article the technique of the control of damp inside IC packages with the help of the sensor in gauges. Necessity of the control of moisture content for improvement of quality and is shown reliability of issued production. The design of the gauge of a dew-point superficially.

Evlyukhin A. B., Fadeeva I. Yu. *Modeling of Image Formation in Scanning Near-Field Optical Microscopy of the Collection and Illumination Modes* 14

Purpose of the investigation is to compare the images of the same sample obtained by numerical modeling of scanning near-field optical microscopy in collection and illumination configurations. Theoretical description is based on self-consistent integral equations for the electric field in the system. The cases when the nanoscale objects can be on and under the sample surface are considered. The results demonstrate the interaction between probe and the sample plays important role in the image formation process.

Rembeza S. I., Svistova T. V., Rembeza E. S., Milashechko V. V. *Influence of Platinum Dopants on the Properties of SnO₂ Films for Gas Sensors* 21

Influence of platinum doping on the electrical properties in temperature range of 20...400 °C in thin gas-sensitive films SnO₂ prepared by reactive sputtering of tin target has been investigated. The changes of concentration and mobility of charge carriers in dependence on platinum content from 0,5 to 3 % weight have been studied. It was determined that platinum introduction has led to increase of gas sensitivity and to decrease of temperature of higher sensitivity SnO₂ films towards ethanol and acetone vaporous in the air.

Todua P. A., Bykov V. A., Volk Ch. P., Gornev E. S., Zhelkobaev Zh. etc. *Scientific and Technological Bases of Metrological Security of Length Dimension in Micrometer and Nanometer Ranges and their Instruction in Microelectronics and Nanotechnologies* 25

The bases of metrological security of the dimensions based on the methods or scanner probe microscopy and laser interferometer — phasemeter are represented. The methods and means of reproduction and transmission of the unit of length dimension in the indicated range with absolute binding to the state primary standard of the unit of length — the meter are offered; the technology is developed and

tree-dimensional micro-nanorelief of surface are created and also the algorithms and the package of programs permitting to realize the automated tree-dimensional dimension of the condensed environments are created.

Trufanov A. I., Baturin A. S., Leshukov M. Yu., Chadaev N. N., Sheshin E. P. *Emission Characteristics of Light Sources with Field Emission Cathode Made of Carbon Fibers Bundle* 32

At present time the various applications of the field emission cathodes in a vacuum devices are strongly investigated. Utilizing the field emission cathode provides developing of the new devices with promising parameters. This is the fact, that field emission cathodes made of carbon materials have good emission current stability under condition of sealed off electro vacuum devices. The construction of the cathodoluminescent light source with the field emission cathode made of carbon fibers is described. The characteristics of light sources is analyzed. It is shown, that possible application of the light source is large video screen and boards for outdoors using. The simple control system for video screen is described.

Shilyaev P. A., Pavlov D. A., Khokhlov A. F. *Methods for Calculating the Fractal Dimension of SPM Images* 35

The most popular algorithms for calculating the fractal dimension of scanning probe microscopy (SPM) images were investigated. The algorithms were applied to simulated surfaces with known fractal dimension. The precision of the algorithms was examined. The most precise methods were determined.

Gaikovich K. P., Dryakhlushin V. F. *Study of the Structure of Near-Fields Emission of a Semiconductor Laser* 39

Results of SNOM measurements analysis of a near-field structure of the semiconductor laser emission are presented. The achieved higher resolution makes it possible to observe thin inhomogeneities of near-field laser emission, which are likely related to nanoscale inhomogeneities of the emitting laser surface. The microscope resolution is determined by the size of the probe aperture (~50–100 nm), which is much smaller than the wavelength of light. It was possible to discern in SNOM laser emission images small, comparable to the probe size, inhomogeneities of structure, the true form and magnitude of which are inevitable smoothed over the scale of probe transfer function. To retrieve the true structure of near-field laser emission, the method of generalized discrepancy based on the Tikhonov's theory of ill-posed problems was used. To test this method, numerical modelling has been carried out and measurements results have been processed taking into account the probe transfer function determined from the test measurements with the etched vanadium film. Then, image deconvolution method is applied to retrieve images of the near-field emission of semiconductor laser distorted by the instrument transfer function influence. Using this approach, in the SNOM measurements small (3–4 %) variations with a spatial size of about 50 nm have been discerned. The form of these inhomogeneities was similar with the form of the laser emitting surface relief measured simultaneously using atomic-force microscope.

Подписку за рубежом принимают:

For foreign subscribers:

Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru; Tel.: +7(095) 284-5008. Fax: (+7) 281-3798

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