

**МСТ**

# МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

**№ 11 ◆ 2004****ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

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

Российской Академии наук

Издаётся с 1999 г.  
ISSN 1684-6419**Главный редактор**  
Мальцев П. П.**Зам. гл. редактора**  
Лучинин В. В.**Редакционный совет:**  
Аристов В. В.  
Васильев В. В.  
Гапонов С. В.  
Каляев И. А.  
Климов Д. М.  
Лифшиц В. Г.  
Мокеров В. Г.  
Никитов С. А.  
Чаплыгин Ю. А.**Редакционная коллегия:**  
Антонов Б. И.  
Астахов М. В.  
Белоус А. И.  
Быков В. А.  
Васильев А. А.  
Волчихин В. И.  
Горнев Е. С.  
Градецкий В. Г.  
Журавлев П. В.  
Захаревич В. Г.  
Кальнов В. А.  
Карякин А. А.  
Кузин А. Ю.  
Мокров Е. А.  
Норенков И. П.  
Панич А. Е.  
Панфилов Ю. В.  
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.**Отв. секретарь**  
Лысенко А. В.**Редакция:**  
Безменова М. Ю.  
Григорин-Рябова Е. В.  
**Учредитель:**  
Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕМЕНТЫ НАНО- И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Алексин В. А. Одномерные микрооптикоэлектромеханические системы и их применение в устройствах отображения и регистрации информации . . . . . 2

### СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

Адамов Ю. Ф., Сомов О. А., Шевченко Е. А. Синхронизация и связность сигналов в системах на кристалле . . . . . 8

### КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

Козлов А. В., Тихонов Р. Д. Отрицательная чувствительность по току биполярного магнитотранзистора . . . . . 19

Кравченко И. В., Коноплев Б. Г., Рындин Е. А. Моделирование распределения температуры в конвективном микроакселерометре. . . . . 22

### НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Аристов В. В., Куюмчян А. В., Суворов А. Ю., Ishikawa T., Исоян А. А., Труни К. Т., Sarkisian E. Восстановление Фурье-голографмы с помощью фазовой зонной пластиинки для рентгеновского излучения . . . . . 26

Панфилов Ю. В., Самойлович М. И., Зилова О. С. Исследование поверхности опаловой матрицы с тонкопленочными покрытиями . . . . . 29

Бибишкин М. С., Забродин И. Г., Зуев С. Ю., Клюенков Е. Б., Пестов А. Е., Салащенко Н. Н., Чехонадских Д. П., Чхало Н. И. Лабораторные методы исследования многослойных зеркал для экстремального ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения . . . . . 34

Балабанов Д. Е., Никитов С. А. Исследование двумерных микромагнитных полей рассеяния методом компьютерной магнитооптической визуализации . . . . . 41

Contents . . . . . 48

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

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

#### ПОДПИСКА:

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

# ЭЛЕМЕНТЫ НАНО- И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 004.327.12+621.3.049.77

**В. А. Алексин**, канд. техн. наук, доц.,  
Московский государственный институт  
радиотехники, электроники и автоматики  
(технический университет)

## ОДНОМЕРНЫЕ МИКРООПТИКО- ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В УСТРОЙСТВАХ ОТОБРАЖЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ИНФОРМАЦИИ

*Рассмотрены принципы построения и функционирования проекционных дисплеев и принтеров с одномерными МОЭМС на основе эластомеров и GLV-технологии.*

### Введение

Одним из направлений микросистемной техники являются микрооптикоэлектромеханические системы (МОЭМС). МОЭМС можно определить как микросистему с электрическим управлением, в которой электрические сигналы управляют механической деформацией оптической среды, что приводит к образованию рельефа и пространственно-временной модуляции проходящего или отраженного света.

С середины XX века и до настоящего времени актуальной научно-технической и технологической проблемой является разработка систем отображения информации (СОИ), в частности, телевизионной информации в реальном времени на большие экраны коллективного пользования с размерами до 50–100 м<sup>2</sup>. История развития этого направления техники включает многие системы, использовавшие различные физические принципы: проекторы на кинескопах, активные плоские экраны, лазерные проекционные системы, проекторы с модуляцией независимого источника света (жидкокристаллические проекторы, рельефографические проекторы).

Рельефографические проекторы в течение нескольких десятилетий были единственным классом СОИ, способным проектировать телевизионное изображение на экраны размером до 100 м<sup>2</sup>. Первый промышленный рельефографический проектор "Эйдофор" был создан в 1952 г. Разработка проектора была выполнена Фишером в период с 1939 по 1943 гг. [1, 2].

В нашей стране выпускались рельефографические проекторы "Аристон". Эти проекторы назы-

вают светоклапанными. Внутри специальной электронно-лучевой трубки с отклоняющей системой расположено сферическое зеркало с масляным слоем. Электронный луч формирует на масляном слое скрытое изображение кадра в виде пространственного распределения зарядов. Под действием зарядов происходит деформация поверхности слоя масла с мелкой периодической структурой, образующая фазовую дифракционную решетку. Система воспроизведения представляет собой шлиренг-проектор, преобразующий фазовую модуляцию считывающего света в амплитудную модуляцию интенсивности света на экране. Проекторы "Эйдофор" в черно-белом варианте давали на выходе световой поток 4000 лм, разрешение до 1000 строк, контраст 100:1. В цветном варианте использовались три проекционные системы (R,G,B) и сложение цветов.

Теоретические основы "Эйдофора" разработаны Мастом [3] и развиты Гущо Ю. П. [4, 5]. По принципу действия рельефографические проекторы "Эйдофор" и "Аристон" являются микрооптико-электромеханическими системами, хотя и были громоздкими устройствами (масса до 700 кг). Эти проекторы имели существенные технологические и эксплуатационные недостатки: слой масляной жидкости в процессе эксплуатации испарялся и для поддержания вакуума была необходима непрерывная откачка баллона; наличие паров масляной жидкости быстро выводило из строя катод ЭЛТ.

В США фирмой "General Electric" [6, 7] были выпущены более компактные цветные рельефографические проекторы PJ5000 и PJ6000 с выходным световым потоком 750 лм, разрешением 600 строк, контрастом 75:1, потребляемой мощностью 2,5 кВт, массой 62 кг.

Телевизионные проекторы с масляным слоем подтвердили потенциальные возможности рельефографии в создании СОИ с большими экранами, однако техническая сложность и высокая стоимость проекторов с масляным слоем требовала проведения разработок более простых и дешевых рельефографических устройств.

В течение 1970–1990-х годов в нашей стране под руководством проф. д-ра техн. наук Гущо Ю. П. с участием автора данной статьи активно проводились научные исследования и экспериментальные разработки систем с безвакуумными одномерными эластомерными рельефографическими модуляторами света (ЭРМС). Было предложено много оригинальных ЭРМС, рельефографических устройств отображения и регистрации информации, устройств управления матричными и

линейными модуляторами света, оптических устройств рельефографических проекторов и принтеров. Предложенные устройства защищены авторскими свидетельствами, по наиболее важным устройствам проведены теоретические и экспериментальные исследования, опубликованы статьи и доклады.

Новый этап активного развития и внедрения в производство рельефографических систем начался в 1994 г., когда была основана компания Silicon Light Machines (Саннивейл, Калифорния, США) для развития и коммерциализации ряда продуктов, которые базируются на технологии Grating Light Valve (GLV) (решетчатый световой клапан) [8–10]. GLV-устройства являются одним из типов МОЭМС — подвижной отражающей свет поверхностью, созданной непосредственно на кремниевой подложке с применением стандартных полупроводниковых процессов и оборудования.

В данной статье рассмотрены принципы работы устройств отображения и регистрации информации с одномерными ЭРМС и GLV-модуляторами света, показано соответствие между ними и обсуждаются перспективы развития данного класса МОЭМС.

### Устройства отображения и регистрации информации с одномерными ЭРМС

Принцип работы рельефографического устройства с одномерным ЭРМС иллюстрируется схемой, показанной на рис. 1. Точечный источник света 1 через конденсор 2 освещает пространственно-временной модулятор света (ПВМС), состоящий из двух стеклянных пластин 3, прозрачного деформируемого слоя 5, нанесенного на заземленный прозрачный электрод 4, прозрачных управляющих электродов — четных 8 и нечетных 9, источника управляющих сигналов 7. Нечетные электроды 9 в простейшем случае могут быть заземлены. При отсутствии управляющих сигналов на четных электродах 8 проходящий через ПВМС свет собирается объективом 11 на непрозрачной диафрагме 12 и не попадает на экран 13. Если на четные управляющие электроды 8 подано напряжение, возникает деформация поверхности слоя 10. Периодический рельеф образует управляемую фазовую дифракционную решетку. Свет на этом участке модулируется по фазе и вследствие дифракции проходит мимо диафрагмы на экран 12, создавая на экране изображение светлой точки 14, оптически связанное с деформированным участком эластомерного слоя. Ширина электродов 1 и шаг  $w$  зависят от возможностей использованной технологии фотолитографического процесса и могут составлять соответственно 10 и 20 мкм. В экспериментальных ЭРМС были достигнуты значения 50 и 100 мкм. Толщина

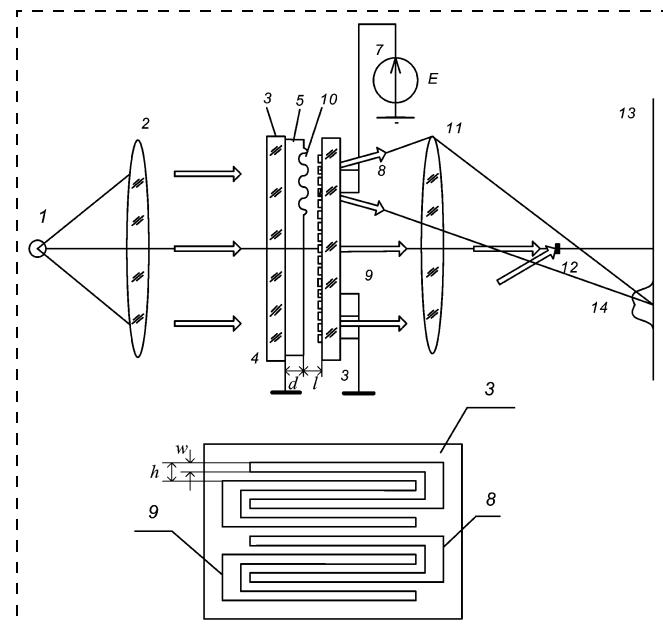


Рис. 1. Схема рельефографического устройства с одномерным ЭРМС

слоя  $d \approx 50$  мкм, зазор  $l \approx 20$  мкм. Размер кадра эластомерного носителя (от  $20 \times 20$  мм до  $40 \times 40$  мм) зависит от типовых размеров пластин в фотолитографическом процессе, точности изготовления стеклянных пластин, эластомерного слоя и установки зазора.

На основе этого принципа были разработаны и исследованы матричные рельефографические индикаторы [8, 9], например, монохромные устройства отображения информации на большие экраны [10–13], цветные устройства отображения информации [14], устройства записи информации на светочувствительный носитель [15] и т. д.

Особенностью перечисленных устройств является применение разработанного специально для одномерных многоканальных ЭРМС цилиндрического шлирен-проектора (ЦШП) [14, 19], оптическая схема которого показана на рис. 2. Положительная сферическая линза 1 и отрицательная цилиндрическая линза 2, являясь осветительными,

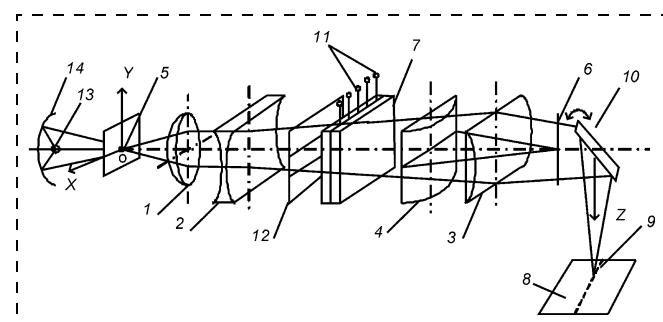


Рис. 2. Оптическая схема цилиндрического шлирен-проектора

одновременно с положительной длиннофокусной цилиндрической линзой 3 образуют сферацилиндрический телескопический объектив и обеспечивают сжатие изображения в вертикальной плоскости  $YOZ$ , называемой плоскостью сжатия. В горизонтальной плоскости  $XOZ$ , называемой плоскостью визуализации, линза 1 и положительная цилиндрическая линза 4 совместно с непрозрачной линейной диафрагмой 6 образуют оптическую систему визуализации фазовой рельефной записи.

Модулятор 7 расположен между линзами 2 и 4. Такое расположение элементов оптической схемы при сохранении малых габаритных размеров проектора позволяет получить большое фокусное расстояние телескопического объектива и большой коэффициент аноморфозы. В результате этого весь световой поток, проходящий через модулятор света, на экране 8 будет сведен в световую строку 9, которая в вертикальной плоскости является изображением точечного отверстия диафрагмы 5, а в горизонтальной плоскости — визуализированным изображением носителя записи.

Элементы строки можно промодулировать по яркости и цвету модулятором 7. Для воспроизведения цветных изображений электроды выполняют в виде трех секций, управляемых напряжениями записи основных цветов и освещаемых через трехцветный светофильтр 12 [17]. Цилиндрическая оптика в плоскости сжатия воспроизводит на экране строку изображения. Поэтому сведение промодулированных световых лучей осуществляется только по одной координате  $Y$  линзами 1, 2 и 3 одновременно со сжатием светового потока в строку. Источником света может служить дуговая лампа 13 с эллиптически отражателем 14 или лазеры (один для монохромного проектора и три для цветного).

Строчку развертывают по кадру с помощью сканирующего зеркала 10. Для уменьшения момента инерции зеркала фокусное расстояние линзы 4 выбирают таким, чтобы ее фокальная плоскость располагалась на выходе линзы 3. В этом месте световой поток сжимается в вертикальную полосу и перекрывается диафрагмой 6. Зеркало установлено непосредственно за диафрагмой. Диафрагма 6 перекрывает нулевой дифракционный порядок и визуализирует фазовую запись.

В рельефографических устройствах регистрации информации на светочувствительных носителях зеркало 10 отсутствует или неподвижно, и световая строка проецируется непосредственно на оконечный носитель.

Как видно, ЦШП является оптическим устройством с двумя плоскостями симметрии. В плоскости  $XOZ$  он представляет собой одномерную систему шлирен-оптики, расчет которой выполняют методом, описанным в [20]. Оптимизация пара-

метров ЦШП в плоскости сжатия  $YOZ$  выполнена в [19].

Цикл оптического переключения экспериментальных ЭРМС достигал 30—50 мкс, что позволяло воспроизводить телевизионные изображения в реальном масштабе времени. ЭРМС передает градации яркости при изменении управляющего напряжения. К недостаткам ЭРМС можно отнести сравнительно высокие управляющие напряжения (100—200 В), что затрудняет создание микроэлектронных схем управления.

В настоящее время за рубежом продолжаются разработки МОЭМС на основе эластомеров [21].

### Современные одномерные МОЭМС на основе GLV-технологии

Концепция оригинального GLV-устройства была разработана в Стэнфордском университете (США). В дополнение к лицензии на оригинальную работу Стэнфорда компания Silicon Light Machines имеет более 100 выданных патентов, отражающих многие аспекты конструкции и изготовления GLV-устройств. GLV-технологии используются в оптических аттенюаторах и переключателях, принтерах прямой плоской печати, телевизионных проекторах высокого разрешения (HDTV), цифровых кинопроекторах и т. п. [23—26].

Базовая конструкция и принцип работы GLV-модулятора света показаны на рис. 3 (см. вторую сторону обложки).

Каждый элемент GLV-устройства (минимальный адресуемый оптический переключающий элемент, отображающий один пиксель изображения) является переменной дифракционной решеткой, сформированной подвижными лентами на поверхности кремниевой пластины. Он обычно состоит из шести укрепленных с двух сторон параллельных лент, выполненных из нитрида кремния ( $Si_3N_4$ ) и покрытых отражающим слоем. Этот верхний слой используется как оптический элемент и как электрический проводник и изготавливается обычно из алюминия. Поверхность под лентами действует как общий электрод. Он выполнен на пластине кремния, покрытой слоем оксида и вольфрама. На рис. 4 (см. вторую сторону обложки) показана технология ленточных электродов GLV-модулятора [27, 28]. Типичные размеры GLV-элемента следующие: ширина пикселя, формируемого одним GLV-элементом, составляет 25 мкм, ширина лент 3—6 мкм, зазор между лентами ~0,6 мкм, длина лент 120—150 мкм, толщина лент 100 нм, воздушный зазор 650—1300 нм.

GLV-модулятор работает следующим образом (рис. 3). Когерентный свет 4 с длиной волны  $\lambda$  от осветителя, отражаясь по направлению 6 от недеформированных пикселей 2 с плоской отражаю-

щей поверхностью, проецируется объективом 5 на непрозрачную заслонку 7 и не попадает на экран 10. Включенный пиксель 3 электростатическим отклонением чередующихся лент образует прямоугольную дифракционную решетку путем подачи на ленточные электроды управляющего напряжения в несколько вольт. В результате дифракции отраженный свет огибает заслонку 7 и создает на экране изображение светлого пикселя 11. Визуализирующая диафрагма может быть выполнена в виде двух щелей 8 и 9, пропускающих  $-1$ -й и  $+1$ -й дифракционные порядки. Максимальная светоотдача (теоретически до 87 %) достигается при отклонении подвижных лент на  $\lambda/4$ . GLV-элемент может работать как в дискретном режиме (когда чередующиеся ленты или не отклонены, или отклонены точно на  $\lambda/4$ ), так и в непрерывном аналоговом режиме (с отклонением чередующихся лент в положение между нулем и  $\lambda/4$ ).

Базовый шаблон дифракционной решетки, используемый для формирования простого переключающего GLV-элемента, может быть расширен добавлением составных элементов, расположенных рядом практически без дополнительных зазоров. Если все элементы в многоэлементной линейке установлены по одним значениям, выход равномерно освещенной линейки является равномерной, гладкой и плоской световой линией. В другом случае каждый элемент может быть точно установлен на определенный и постоянный уровень ослабления. Линейный одномерный GLV-модулятор может формировать строку (или столбец) световых пикселей с управляемой яркостью.

Составные GLV-устройства создают линейную матрицу из 2, 10, 100 и даже 1000 GLV-элементов. Одномерные GLV-устройства используются как многоканальные управляемые оптические аттенюаторы для печатающих систем и дисплеев, где требуется 1080 индивидуально переключаемых оптических элементов.

Зависимость светоотдачи собственного модулятора от управляющего напряжения показана на рис. 5. График имеет монотонный характер, сообщается о воспроизведении 256 градаций полутонов. Световая эффективность GLV-устройств (отношение выходного светового потока к входному) с учетом дополнительных потерь в оптических элементах составляет 70 %. Однако малая площадь активной зоны ( $25 \text{ мкм} \times 27,7 \text{ мм} = 0,7 \text{ мм}^2$ ) требует обязательного применения лазерных источников света, так как некогерентные источники не обеспечивают достаточных световых потоков на выходе устройства.

В GLV-модуляторе длина активной зоны на подвижной ленте составляет 25 мкм при длине ленты порядка 150 мкм. Это не позволяет увеличить площадь активной зоны путем сложения од-

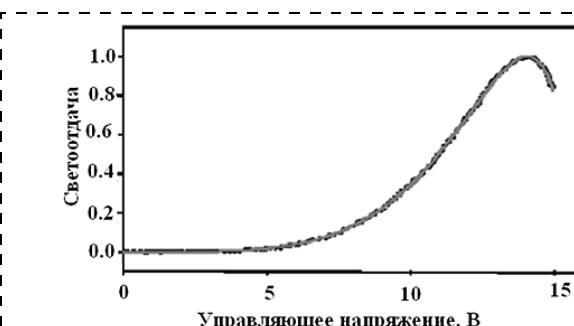


Рис. 5. Зависимость светоотдачи GLV-устройства

номерных GLV-линеек в двумерный матричный массив с синхронным управлением элементами столбцов, что могло бы повысить светоэнергетические характеристики GLV-устройств и позволить использовать некогерентные источники света. Особо отмечается высокое быстродействие GLV-модуляторов (наблюдался оптический отклик за 20 нс) и высокая надежность (до  $6 \times 10^{12}$  циклов переключений).

Устройства отображения и регистрации информации, использующие GLV-технологию, по принципиальным схемам аналогичны разработанным нами ранее рельефографическим устройствам с ЭРМС. В 2003 г. в США запатентована проекционная система с модуляцией света в фокальной плоскости GLV-модулятором [29]. Устройство показано на рис. 6 и содержит лазерный источник света 1, осветительный объектив 2, линейный GLV-модулятор света 3, оптическую шлирен-систему 4 с заслонкой 5, зеркальный сканатор 6, управляющую электронику.

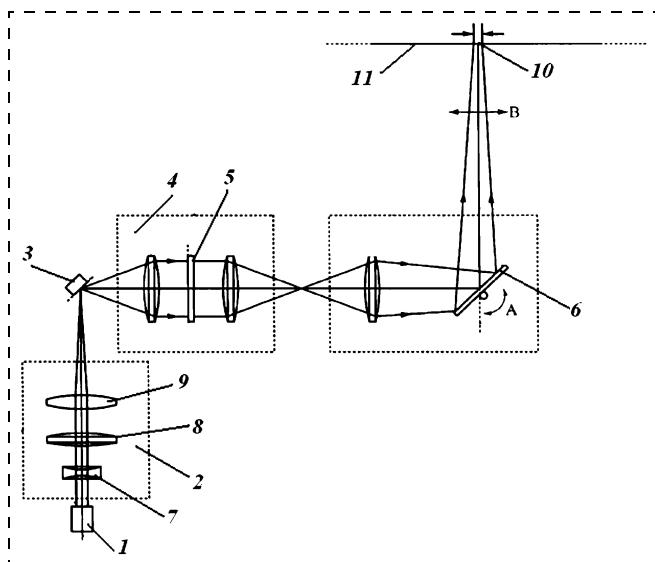


Рис. 6. Проекционная система с GLV-модулятором

Осветительный объектив 2 содержит рассеивающую линзу 7, коллиматор 8, цилиндрическую линзу 9. Световая полоса фокусируется вблизи активной поверхности GLV-модулятора, так как активная зона имеет высоту всего 25 мкм. Световая строка 10 проецируется на экран 11, где формируется кадр изображения. Эта система является аналогом изобретений [14, 15, 30]. Недостатком данного устройства является малая активная зона GLV-модулятора, что требует фокусировки лазерного луча в непосредственной близости от активной поверхности и может приводить к тепловым перегрузкам.

В [31] сообщается о создании лазерного проектора на основе GLV-матрицы с разрешением  $1080 \times 1920$  пикселей, контрастом более 1000:1, с кадровой разверткой по строке с частотой 100 Гц и периодом переключения GLV-элементов менее 4,2 мкс. Проектор воспроизводит полутонаовые изображения с числом градаций 256 и цветные изображения при использовании трех GLV-матриц и сложения цветов. Ширина GLV-пикселя составляет 25 мкм, шаг расстановки 25,5 мкм, активная зона GLV-матрицы  $25 \text{ мкм} \times 27,7 \text{ мм}$ . Габаритный размер матрицы (без блока управления)  $34 \times 6 \times 2$  мм.

В [33] сообщается о системе проекционного дисплея, который продемонстрировала фирма Sony летом 2002 г. Дисплей состоит из трех GLV-модуляторов и красного, зеленого и синего лазеров. Проектор имеет оптические системы для освещения модуляторов, визуализации и проекции изображений. Теоретически система может обеспечить бесконечно большой контраст. В GLV-проекте Sony достигнут контраст 3000:1, тогда как наиболее продвинутые проекторы других технологий имеют контраст не более 1000:1. МОЭМС GLV-технология дает также высокое быстродействие и высокое качество цветовоспроизведения благодаря использованию чистых цветов красных, зеленых и синих лазеров. GLV-модулятор с размерами  $34 \times 6 \times 2$  мм, имеет 1080 пикселей и содержит 6480 ленточных электродов, сформированных на поверхности кремниевой подложки вместе с чипами управления.

Процесс изготовления достаточно сложный, но Sony собирается завершить разработку GLV-модуляторов и лазеров в течение двух лет. Модулированный световой столбец из 1080 пикселей проецируется на экран. Горизонтальная развертка зеркальным сканатором с частотой 60 Гц создает широкоформатное изображение  $1080 \times 1920$  пикселей (рис. 7).

Компания Sony оптимизировала длину волны красных, зеленых и синих лазеров, выбрав 642, 532 и 457 нм соответственно. Как источник освещения

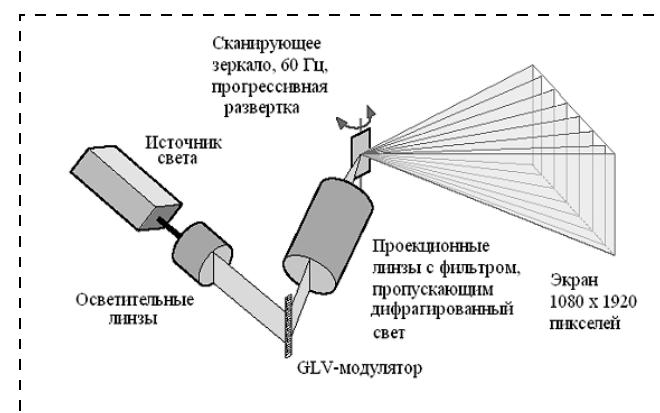


Рис. 7. Лазерный GLV-проектор Sony

GLV-системы, лазеры по цветовоспроизведению превосходят дисплеи, в которых используются лампы. Цветовой охват в GLV-проекторе более чем в 2 раза больше, чем в ЭЛТ высокого разрешения.

Sony разработала GLV-модуль, включающий собственно GLV-модулятор света и драйвер на интегральных схемах. Размеры модуля  $100 \times 40 \times 5$  мм определяют и размеры оптического устройства. Представленный Sony мультимедийный проектор позволяет воспроизводить телевизионные и цифровые изображения с высоким разрешением и контрастом.

Электрофотографический принтер с GLV-модулятором [33] по принципиальной схеме аналогичен принтеру с ЭРМС [18]. В [34] сообщается о создании GLV-принтера для зонной плоской фотолитографии (Zone-plate-array-lithography, ZPAL), который имеет 1088 затворов с быстродействием 20 нс и передачей 256 уровней серой шкалы, что позволяет создавать на рабочей площадке  $200 \times 200$  мкм шаблоны с периодом элементов 600 нм при точности позиционирования 10 нм. Имеются сведения, что такие установки уже продаются в России.

Для повышения световой эффективности принтера фирма Kodak разработала и запатентовала пространственный модулятор света, представляющий собой конформную решетчатую электромеханическую систему (GEMS), в котором каждый ленточный электрод имеет большую протяженность, опирается на промежуточные опоры с периодом  $\lambda$  и при включении управляющего создает периодическую структуру деформаций ленты [35]. При этом увеличивается размер кадра и световая эффективность.

### Заключение

Одномерные МОЭМС используют в качестве светомодулирующей среды деформируемые эластомеры или подвижные ленточные электроды.

GLV-устройства являются современными микрооптикоэлектромеханическими системами, выполненными с использованием высоких технологий микроэлектроники, обладают уникальными техническими характеристиками по быстродействию (время оптического отклика до 20 нс), оптической эффективности, высокой разрешающей способности, возможности воспроизведения полутонаов, высокой надежности и стабильности, точности оптической адресации, простоте производства и интеграции с CMOS-логикой.

Это делает разработку, исследование и промышленное освоение GLV-устройств различного назначения весьма перспективными и многообещающими направлениями науки и техники. Линейные одномерные GLV-устройства, как и ЭРМС, используются в устройствах отображения информации на большие экраны и в устройствах регистрации информации на светочувствительных носителях, причем одинаковая оптическая структура модуляторов и принцип действия (многоканальный линейный фазовый модулятор света) определяют одинаковую структуру и принцип действия рельефографических устройств отображения и регистрации информации, использующих эти классы модуляторов.

Выполненные ранее в нашей стране исследования МОЭМС с ЭРМС могут быть использованы применительно к GLV-устройствам.

#### Список литературы

1. Fisher F. E. Method and apparatus for reproducing television pictures. US Pat. N 2391450, cl. 178—787.
2. Fisher F. R. Process and apparatus for projecting television pictures. US Pat. N 2391451, cl.178—787.
3. Mast F. Beitrage zur Theorie Eidophorverfahrens. Dissertation, Zurich, EPF, 1953.
4. Гущо Ю. П. Фазовая рельефография. М.: Энергия, 1974.
5. Гущо Ю. П. Физика рельефографии. М.: Наука, 1992.
6. Good W., Graser M. Deformable Medium Color Projection System. US Pat. N 3305630, cl. 178—5.4. 1967.
7. Good W. Projection television. Proc. SID. 1976. V.17/1. P. 3—7.
8. Amm D. T. and Corrigan W. Optical Performance of the Grating Light Valve Technology // Photonics West-Electronics Imaging '99, Projection Display V. January, 1999.
9. Corrigan R. W, Amm D. T. and Gudeman C. S. Grating Light Valve. Technology for Projection Displays // International Display Workshop, Kobe, Japan. December 1998.
10. Amm D. T. and Corrigan R. W. Grating Light Valve. Technology // Society for Information Display Symposium, Anaheim, CA. May 1998.
11. Алексин В. А., Гущо Ю. П. и др. Матричное рельефографическое устройство для отображения информации. Авт. свид. № 636671 // БИ N 45. 1978.
12. Алексин В. А. Матричное рельефографическое устройство для отображения информации. Авт. свид. № 980150 // БИ N 45. 1982.
13. Алексин В. А., Гущо Ю. П. Устройство для оптической записи и воспроизведения. Авт. свид. № 678519 // БИ N 29. 1979.
14. Алексин В. А., Гущо Ю. П., Соловьев П. Н. Устройство для отображения информации. Авт. свид. № 1075306 // БИ N 7. 1984.
15. Алексин В. А., Соловьев П. Н. Устройство для отображения информации. Авт. свид. № 1277194 // БИ N 46. 1986.
16. Гущо Ю. П., Алексин В. А., Левицкая Е. А. Рельефографическое проекционное устройство воспроизведения ТВ сигналов // Техника кино и телевидения. 1983. № 11. С. 41—45.
17. Алексин В. А. Устройство для цветного отображения информации. Авт. свид. № 1195386 // БИ N 44. 1985.
18. Алексин В. А., Гущо Ю. П. Рельефографическое устройство для записи информации на светочувствительном оконечном носителе. Авт. свид. № 959031 // БИ N 34. 1982.
19. Алексин В. А., Гущо Ю. П. Расчет оптических параметров цилиндрического шлирен-проектора // Оптико-механическая промышленность. 1985. № 7. С. 26—28.
20. Алексин В. А., Гущо Ю. П. Расчет величины светоотдачи при воспроизведении рельефной записи шлирен-оптикой с круглыми диафрагмами // Оптика и спектроскопия. 1977. Т. 43. № 5. С. 978—983.
21. Sakarya S., Vdovin G. V., Sarro L. Technology of spatial light modulators based on viscoelastic layers // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5036. P. 477—482.
22. Sakarya S., Vdovin G. V., Sarro P. M. Low-cost technological approaches to micromachined spatial light modulators // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4825. P. 264—271.
23. Corrigan R., Cook R. and Favotte O. Grating Light Valve Technology / Breakthrough MEMS Component Technology for Optical Networks // Copyright Silicon Light Machines. 2001. June 2001 B.
24. Amm D. T. and Corrigan R. W. Optical Performance of the Grating Light Valve Technology // Photonics West-Electronics Imaging '99, Projection Display V, January. 1999.
25. Corrigan R. W, Amm D. T. and Gudeman C. S. Grating Light Valve. Technology for Projection Displays // International Display Workshop, Kobe, Japan, December 1998.
26. Amm D. T. and Corrigan R. W. Grating Light Valve. Technology // Society for Information Display Symposium, Anaheim, CA. May 1998.
27. Method of Making and Apparatus for a flat Diffraction Grating Light Valve U. S. Patent N 5661592, Int. cl. G02B26/00, U. S. cl. 359/291. 1997.
28. Flat Diffraction Grating Light Valve. U. S. Patent N 5841579, Int. cl. G02B5/18, U. S. cl. 359/572. 1998.
29. Modulation of light out of the focal plane in a light modulator based projection system. U. S. Patent 6, 614, 580, Int. cl. G02B 026/00, U. S. cl. 359/290, 2003.
30. Алексин В. А. Устройство для отображения информации. Авт. свид. № 1365120 // БИ № 1, 1988.
31. Amm D. T. and Corrigan R. W. Optical Performance of the Grating Light Valve Technology // Photonics West-Electronics Imaging '99, Projection Display V. January 1999.
32. Grating Light Valve Display Device. MEMS — A New Electronic Device that Combines Both Electronic and No-electronic Devices // EE Times, June, 2002.
33. Electrostatic printer having an array of optical modulating grating valves. U. S. Patent 6, 025, 859 Int.cl. B41J 002/415, U. S. cl. 347/135. 2000.
34. Gil D., Menon R., Tang X., Smith H., and Carter D. J. D. Parallel maskless optical lithography for prototyping, low-volume production, and research // J. Vac. Sci. Technol. American Vacuum Society Nov'Dec 2002.
35. Spatial Light Modulator with Conformal Grating Device. U. S. Patent 6, 307, 663, Int.cl. G02B 026/00, U. S. cl. 359/231, 2001.

# СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

УДК 621.397.62: 681.51

**Ю. Ф. Адамов, д-р техн. наук, О. А. Сомов,  
Е. А. Шевченко**  
ООО "Юник Ай Сиз", Зеленоград, г. Москва

## СИНХРОНИЗАЦИЯ И СВЯЗНОСТЬ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ НА КРИСТАЛЛЕ

Проведено исследование совместной работы сложнофункциональных блоков на высоких частотах в составе систем на кристалле (СНК) и устройств локальной синхронизации в составе этих блоков. Даны рекомендации по обеспечению синхронизации сигналов на всех этапах проектирования СНК. Выделены основные направления развития схемотехники устройств локальной синхронизации и описаны основные элементы подсистем синхронизации для СФ-блоков. Показаны новые возможные эффективные решения и практически реализуемые схемы.

### Введение

Системы на кристалле (СНК) — это, в первую очередь, новая методология разработки заказных микросхем на основе уже готовых сложнофункциональных блоков (СФ-блоков). Основой методологии является совместимость СФ-блоков по принципу "включи и работай" (plug-and-play в англоязычной литературе) без их переделки для каждой конкретной системы. Для реализации этого принципа СФ-блоки должны разрабатываться как автономные устройства со своими системами питания, интерфейсами и блоками синхронизации.

Первой составляющей новой методологии должны стать единые требования к СФ-блокам, обеспечивающие их совместимость в системе. Обязательными являются требования технологической совместимости, наличия детальных спецификаций и моделей высокого уровня.

Второй составляющей должны стать конкретные технические решения, обеспечивающие выполнение правил разработки СФ-блоков. Интерфейсы, системы питания и синхронизации СФ-блоков должны существенно отличаться от аналогичных по назначению систем, но общих для всей СНК. В СФ-блоках нельзя использовать элементы, находящиеся вне этих блоков. Площадь на кристалле очень ограничена и дополнительные элементы, требуемые для объединения СФ-блоков в систему, не должны занимать большую часть кристалла.

Третьей составляющей методологии должны стать универсальные правила, обеспечивающие

объединение СФ-блоков в систему с наименьшим взаимным влиянием элементов системы. Современные системы проектирования не могут обеспечить точный учет всех связей между проводниками и транзисторами, поэтому при расчетах сигналов в СНК должны быть выделены и учтены в модели наиболее критические и опасные связи, что не может быть сделано автоматически.

Сейчас еще нет четко сформулированных правил проектирования СНК. Однако специалисты во всем мире работают над этими проблемами. Мы также пытаемся внести посильный вклад в развитие методологии проектирования СНК, в частности, в решение проблемы создания подсистем синхронизации внутри СФ-блоков.

В настоящей статье описаны проблемы, связанные с распределением и синхронизацией сигналов в системах на кристалле, а также известные технические решения, направленные на повышение быстродействия СНК.

### Условия передачи сигналов в системах на кристалле

Любой алгоритм обработки данных требует определенной последовательности и формы сигналов в пределах допустимых отклонений. На форму сигналов влияют шумы и помехи в системе. На задержки сигналов влияют нагрузочная способность элементов схемы, время распространения сигналов в проводниках и те же помехи. Совокупность ограничений на последовательность, задержки и форму сигналов называется связностью сигналов.

Типовые значения задержек сигналов в элементах БИС — 20...100 пс, а рекордные значения — менее 1 пс. Доступные скорости обработки сигналов превышают 40 Гбит/с. Однако скорости передачи информационных потоков ограничиваются не логическими элементами, а системой связей. В сложных БИС суммарная электрическая емкость проводников связи во много раз превышает емкости всех транзисторов. При переходе к пикосекундным фронтам импульсов проводники превращаются в распределенные RLC-линии связи. Вычислительных ресурсов для моделирования сигналов в миллионах распределенных линий связи сейчас нет, и в ближайшем будущем не появится, поэтому в расчетах линий связи используются модели с сосредоточенными и усредненными параметрами.

Рассмотрим подробнее виды искажений сигналов в цифровых элементах системы и линиях связи.

**Первый вид** помех — искажение формы входных или выходных импульсов БИС вследствие воз-

буждения колебаний в паразитном  $LC$ -контуре, образованном элементами корпуса. При этом появляются изломы на фронтах, соответствующие наложению паразитных колебаний на рабочий импульс.

**Второй вид** искажений связан с разницей в нагрузочной способности логического элемента для фронта и среза. Это приводит к разнице задержек сигнала для фронта и среза. При последовательном соединении нескольких неинвертирующих элементов происходит либо слияние, либо исчезновение импульсов. На большой емкостной нагрузке возможно смещение логических уровней и появление постоянной составляющей сигнала.

**Третий вид** связан с возбуждением импульсных помех в цепях питания при переключении мощных каскадов. Если одновременно с действием импульсной помехи в цепи питания на входе элемента появляется короткий входной импульс, то возможно нарушение функционирования блока. Нарушение функционирования носит резонансный характер и проявляется только на тех частотах, при которых фронты входных импульсов совпадают с фронтами мощных выходных или синхронизирующих импульсов. Наиболее чувствительными к резонансным помехам являются входные усилители, соединенные с внешними линиями связи.

**Четвертый вид помех** обусловлен электромагнитной связью между проводниками. Электромагнитная связь приводит к появлению паразитных сигналов и изменению задержек рабочих импульсов. Изменение задержек происходит таким образом, что время между односторонними переключениями в разных линиях сокращается, а между разносторонними увеличивается. Нестабильность задержки сигнала при этом возрастает.

**Пятый вид помех** связан с неконтролируемыми процессами в полупроводниковых приборах, обусловленными связью приборов по общей подложке. Это паразитные тиристоры и подложечные токи. Если цепи гальванического подключения подложки или изолирующего "кармана" МОП-транзистора будут иметь повышенное сопротивление, то это может вызвать отпирание  $p-n$ -перехода истока и включение паразитного тиристора. В топологии БИС должно быть предусмотрено распределение контактов к подложке и "карманам" в достаточном количестве и с минимальным сопротивлением для каждого МОП-транзистора.

Качество аналоговых сигналов определяется соотношением сигнал/шум и искажением формы сигналов на нелинейных характеристиках элементов системы. Действие шумов на сигналы характеризуется спектральной плотностью мощности шума. Шумовые свойства аналоговых элементов сис-

темы характеризуются коэффициентом шума. Коэффициент шума показывает, во сколько раз изменяется соотношение сигнал/шум на входе и выходе аналогового элемента. Очевидно, что коэффициент шума всегда больше 1.

Специалисты обычно выделяют четыре составляющие шума. Первая составляющая — это низкочастотный шум, источником которого являются процессы перезарядки объемных и поверхностных состояний, связанных с дефектами кристаллической решетки полупроводника. Спектральная плотность низкочастотного шума очень мала для частот выше 1 кГц и резко возрастает для частот ниже 100 Гц.

Вторая составляющая — тепловой шум, источником которого служит тепловое (брюновское) движение носителей зарядов. Спектральная плотность мощности теплового шума постоянна практически для любых электронных устройств и равна  $4kT$ , где  $k$  — константа Больцмана,  $T$  — абсолютная температура. Если линия связи с сопротивлением  $R$  передает аналоговый сигнал в полосе частот  $\Delta F$ , то к этому сигналу добавится тепловой шум с мощностью

$$I_{\text{ш}} V_{\text{ш}} = 4kT\Delta F.$$

При подаче этого сигнала на усилитель напряжения на его вход будет действовать и дополнительное напряжение тепловых шумов:

$$V_{\text{ш}} = \sqrt{4kTR\Delta F}.$$

Идеальные реактивные элементы (индукторы и конденсаторы) не вносят вклад в тепловой шум, так как их энергия связана с электромагнитным полем, а не с движением зарядов.

Третья составляющая — это дробовой шум, связанный с дискретностью электрических зарядов. Дробовой шум проявляется обычно в приборах, измеряющихnanoамперные и пикоамперные токи, например, в чувствительных фотоприемниках.

Последняя, четвертая составляющая — системный шум, т. е. внутренние помехи в электронной системе. Спектральная плотность системного шума определяется рабочей частотой наиболее мощных блоков. Обычно это частота синхросигнала цифровых блоков.

Не существует единственного и универсального метода обеспечения связности сигналов. Для каждого набора требований к сигналам системы и условиям их реализации составляется свой набор средств борьбы с помехами и неоднородностями в элементах. На каждом этапе проекта используются свои средства обеспечения связности сигналов и все этапы влияют на этот процесс.

## Обеспечение синхронизации сигналов на этапе системного проектирования

При составлении архитектурного плана СНК предпочтение должно отдаваться вариантам, в которых не требуется передавать высокочастотные сигналы одновременно во много блоков. Выгодно использовать конвейерную последовательную обработку и асинхронный протокол передачи данных. Для понижения частоты системного синхросигнала эффективно использование локальных подсистем синхронизации в каждом большом блоке. Подготовка спецификаций на сигналы должна проводиться с учетом воздействия дестабилизирующих факторов. Для цифровых блоков — это технологическая воспроизводимость и кратковременная нестабильность задержек вентилей. Для аналоговых блоков — изменение соотношения сигнал/шум.

Требования к задержкам и длительностям фронтов импульсов должны включать как максимальные, так и минимальные допустимые значения. Без необходимости не следует увеличивать быстродействие отдельных блоков и цепей, так как это только увеличивает потребляемую мощность и создает дополнительные помехи в системе.

Длинные связи между блоками объединяются в шины. Помехоустойчивость связей зависит от энергии сигналов и уровня помех. Уровень перекрестных помех в шинах можно снизить, уменьшая логический перепад. Энергию сигнала можно увеличить, используя низкоомные нагрузки. Наилучшее качество сигналов достигается в согласованных линиях связи, в которых сопротивление нагрузки совпадает с волновым сопротивлением линии. Однако трудно создать линию связи с малыми потерями и волновым сопротивлением более 100 Ом. При разумной мощности драйверов (не более 1 мВт) логический перепад в согласованной линии будет очень мал. В согласованной линии связи на кристалле может быть использован один токовый драйвер и только один трансимпедансный входной усилитель. Но и в тех случаях, когда согласование источников и приемников сигнала с линией не достигается, низкоомные (менее 1 кОм) нагрузки значительно повышают помехоустойчивость линий связи.

## Обеспечение синхронизации сигналов на этапе функционального проектирования

На этом этапе проводится совместная оптимизация быстродействия и помехоустойчивости. Моделирование блоков и системы в целом проводится с учетом параметров проводников. На первом этапе моделирования, когда топологии еще нет и конкретные значения параметров проводников неиз-

вестны, используются усредненные значения из ранее завершенных проектов.

Обычно цифровые устройства реализуются как автоматы с конечным числом состояний. Данные фиксируются по синхросигналу (СС) в регистры состояний и распространяются по комбинационным цепям в промежутках между моментами синхронизации. Анализ связности сигналов осуществляется с использованием "глаз"-диаграммы. На "глаз"-диаграмме строятся временные диаграммы сразу всех входных импульсов регистра состояний, включая и синхросигнал. Диаграммы строятся с учетом всех допустимых отклонений задержек входных сигналов. Если на полученном графике остается "глаз", т. е. промежуток времени, в котором не происходит никаких переключений входных сигналов, то система будет работоспособной. По графику определяются необходимые времена установки и удержания входных импульсов регистра состояний. Очевидно, что период синхросигнала должен быть больше суммарного времени установки и удержания. Отношение ширины "глаза" к периоду синхросигнала определяет устойчивость системы к помехам и внешним воздействиям. Хорошим считается отношение более 0,5.

Для выравнивания задержек в шинах передачи данных используются адаптивные драйверы с элементами обратной связи, а также регенераторы формы сигналов. Часто применяется метод регенерации под названием "ромашковый венок", в котором регенераторы-повторители сигналов стоят на входах блоков, подключенных к этойшине.

Для сигналов синхронизации важно не только их одновременное воздействие на регистры состояний, но и длительности фронтов, которые не должны быть больше критической величины для выбранного типа триггеров. Для выравнивания задержек и формирования фронтов цепь синхронизации строится в форме "дерева". Площадь кристалла или цифрового блока, занятая логическими элементами, разбивается на квадранты. Каждый квадрант снова делится на более мелкие квадранты и т. д. Корневой драйвер цепи синхронизации размещается в центре кристалла или блока. Этот драйвер управляет четырьмя драйверами второго яруса, размещенными в центрах больших квадрантов. Далее сигнал идет к драйверам третьего яруса, размещенным в центрах малых квадрантов и т. д. Необходимое число ярусов определяется сложностью схемы и нагрузочной способностью драйверов. Длины проводников в каждом ярусе по возможности выравниваются. Синхросигнал от источника доходит до каждого триггера через одинаковые элементы и линии связи, что обеспечивает минимальный разброс задержек фронтов импульсов.

С уменьшением размеров элементов неизбежно снижается напряжение питания и допустимый уровень аналоговых сигналов. При этом увеличивается разброс параметров всех элементов схемы. Разброс параметров элементов с субмикрометровыми размерами определяется статистической неоднородностью параметров физической структуры на микроскопическом уровне. Поэтому для субмикрометровой КМОП-технологии предпочтительной является цифровая обработка сигналов. Если применение аналоговых блоков необходимо, то в составе КМОП-схемы должны использоваться элементы с напряжением питания не менее 2,5 В. Цепи питания аналоговых блоков обычно полностью отделены от питания цифровых блоков. Для стабилизации питающих и опорных напряжений используются внутренние и внешние блокировочные конденсаторы. Схемы аналоговых блоков строят таким образом, чтобы максимально увеличить динамический диапазон сигналов и приблизить его к напряжению питания.

В аналоговых блоках соотношение задержек сигналов обычно не имеет принципиального значения. Гораздо важнее соотношение сигнал/шум. Уровень тепловых шумов определяется температурой и сопротивлением сигнальных цепей. Для снижения температуры требуется хороший отвод теплоты от кристалла и ограничение потребляемой мощности СНК. Оптимизация шумов — это сложная многопараметрическая задача. Низкочастотная составляющая шума может быть исключена фильтрацией или использованием модуляционных методов обработки сигналов. Широко распространен метод построения схем на переключаемых конденсаторах, использующий принцип модуляции аналоговых сигналов.

Системные помехи снижаются путем выбора рабочего диапазона частот для аналоговых сигналов, в котором мощность системных помех будет минимальна. Методы снижения уровня шумов в аналоговых блоках традиционные и подробно изложены в специальной литературе.

### **Обеспечение синхронизации на этапе физического проектирования**

Основной метод обеспечения синхронизации сигналов при физическом проектировании СНК — это моделирование системы с учетом размещения элементов и реальных параметров проводников. В электрической схеме проводники заменяются многосекционными моделями со сосредоточенными *RLC*-параметрами. Существует программа расчета параметров моделей проводников на основе реальной топологии. Перекрестные электромагнитные связи между проводниками в моделях со сосредоточенными параметрами обычно не учиты-

ваются. Для учета перекрестных связей разработчику необходимо выделить интересующую его группу проводников (например, трансформатор) и определить параметры модели с использованием специального электромагнитного симулятора. После этого заменить в схеме все модели выделенных проводников одной новой групповой моделью связанных проводников. По результатам моделирования проводится совместная оптимизация электрической схемы и топологии. Имеются программы, автоматически выполняющие совместную оптимизацию схемы и топологии цифровых устройств.

Однако еще до проведения совместного моделирования СНК, топологию блоков и системы в целом разрабатывают по определенным правилам.

Соблюдение этих правил сокращает число итераций при разработке топологии и обеспечивает достижение положительного результата.

Особое внимание уделяется цепям питания и синхронизации. Сопротивление цепей питания рассчитывают не для усредненного, а для максимального пикового тока. Обычно пиковый ток системы достигается после рабочего фронта импульса синхронизации. Для пикового тока суммарное падение напряжения в шинах питания и "общей" не должно превышать 10 % логического перепада. На падение напряжения в шинах влияет не только их сопротивление, но и индуктивность. Для снижения индуктивности шины питания и "общей" располагают по возможности ближе друг к другу. Токи в этих шинах должны течь навстречу, т. е. в противоположных направлениях. Для этого контактные площадки "питание" и "общая" размещаются попарно рядом и равномерно по периметру кристалла. Глобальные цепи питания объединяются в кольца по периметру кристалла. Внутри блоков обычно используется встречно-штыревая структура шин питания, удобная для компактного размещения элементов. При разработке топологии цепи питания формируются в первую очередь.

В вторую очередь разводится "дерево" синхронизации. В отсутствии других сигнальных проводников легко удастся выровнять параметры линий связи в каждом ярусе "дерева".

Автоматическая или полуавтоматическая трассировка остальных цифровых элементов выполняется в третью очередь. Причем в программе автоматической трассировки можно указать приоритетные линии связи, которые будут проведены кратчайшим путем, например, для самых высокочастотных сигналов.

Если цифровые блоки проектируются только с использованием различных автоматических программных средств, то при проектировании топологии аналоговых блоков автоматические средства используются ограниченно. Разнообразные па-

метры аналоговых элементов сильно зависят от их топологии и оптимизировать набор этих параметров пока может только разработчик.

При разработке топологии аналоговых блоков решаются две основные задачи: снижение уровня системных шумов и улучшение однородности параметров элементов.

Основной способ снижения системных шумов — это экранирование. Аналоговые блоки отделяются от цифровых и других аналоговых блоков большими зазорами (~100 мкм). В зазорах выполняется заземление подложки для снижения подложечной составляющей шума. Для снижения электромагнитной составляющей сигнальные связи проводятся не во всех уровнях металлизации. Между уровнями связей создаются уровни заземленных экранов. Система питания аналогового блока может включать несколько независимых цепей питания одного номинала.

Для улучшения однородности используются специальные топологические приемы. Эксперименты показывают, что существенными являются два основных типа неоднородностей — микроскопические и макроскопические. Микроскопические неоднородности (менее 1 мкм<sup>2</sup>) обусловлены статистическими процессами формирования структур и определяются площадью элементов. Неоднородности уменьшаются обратно пропорционально корню из площади элемента структуры БИС:

$$\Delta X = \frac{A}{\sqrt{WL}},$$

где  $\Delta X$  — отклонение параметра от среднего значения;  $A$  — коэффициент пропорциональности;  $W$  и  $L$  — геометрические размеры элемента.

Макроскопические неоднородности обусловлены неравномерностью параметров технологических процессов и характеризуются размерами от сотен микрометров до десятков миллиметров. Они проявляются как локальный градиент параметров структуры БИС. Для компенсации градиента используют структуры типа "центроид". Если требуется получить в составе БИС два или более одинаковых элемента, то сначала строят квадратную или прямоугольную матрицу из более мелких одинаковых элементов — секций, а затем эти секции объединяют системой металлизации в более крупные элементы. Причем объединение происходит по такой схеме, чтобы секции каждого крупного элемента равномерно размещались по всей площади матрицы. Для этого в каждом элементе требуется не менее четырех секций.

## Обеспечение синхронизации и связности сигналов на этапах аттестации проекта, производства изделий и их применения

Все предпосылки для надежной бессбойной работы электронной системы закладываются на этапе ее разработки. Однако невозможно создать систему, работоспособную в любых условиях применения и при этом абсолютно устойчивую к любому разбросу технологических параметров элементов. Система будет работоспособна и надежна только при соблюдении достаточно жестких требований к производству и условиям применения. Эти условия определяются на этапе аттестации проекта. Условия производства и эксплуатации составляют единый комплекс ограничений. Например, невозможно изменить условия эксплуатации изделий, не контролируя их работоспособность в этих условиях в процессе производства.

Сложнофункциональные микросхемы имеют повышенную чувствительность к шумам, помехам и неоднородностям физической структуры. Эти особенности усложняют технические процедуры аттестации изделий и установление достоверных критериев отказов. Однако организационные методы обеспечения качества на этапах аттестации, производства и эксплуатации остаются одинаковыми для микросхем любой сложности.

## Элементы подсистем синхронизации для СФ-блоков

Так как маршрут проектирования СНК не предусматривает переделку СФ-блоков, то каждый СФ-блок должен иметь собственную подсистему синхронизации. Функции подсистемы синхронизации в СФ-блоках те же, что и в любых синхронных микросхемах. Это инициализация устройства при включении питания, генерация и распределение синхросигналов, выравнивание задержек на выходных шинах данных и восстановление данных на входах. Совместная работа СФ-блоков в составе СНК достигается реализацией асинхронного протокола передачи данных или передачей синхросигнала вместе с данными по однойшине от одного блока к другому. Для работы с внутренними шинами СНК в состав СФ-блоков вводятся внутренние интерфейсы и синхрогенераторы. Так же как в системах на печатных платах в СНК на все СФ-блоки распределяются параллельно только сравнительно низкочастотные опорные синхросигналы. Высокочастотные синхросигналырабатываются внутри СФ-блоков собственными синхрогенераторами или восстанавливаются внутренними интерфейсами из входного потока данных. Независимая локальная синхронизация снижает уровень помех в общих цепях питания, так как переключения элементов в разных СФ-блоках происходят в разное время.

## Синхрогенераторы для СФ-блоков

Требования к электрическим параметрам синхрогенераторов для цифровых и аналого-цифровых СФ-блоков обычно не очень жесткие. Основная проблема состоит в том, что традиционный маршрут проектирования синхрогенераторов основан на использовании принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и аналоговых методов управления с применением  $RC$ -фильтров низких частот. При этом  $RC$ -фильтры занимают большую площадь на кристалле или подключаются извне через выводы микросхемы. Для СНК с десятью локальными синхросигналами потребуется не менее 30 внешних компонентов на плате, 20 дополнительных выводов корпуса или увеличение площади кристалла в 2–3 раза. Технико-экономические показатели продукции при этом значительно ухудшаются. Для СФ-блоков требуются новые схемы синхрогенераторов, в которых используются цифровые малогабаритные фильтры низких частот без внешних компонентов.

Известные интегральные синхрогенераторы работают по принципу умножения опорной частоты в контуре с ФАПЧ и содержат релаксационный генератор, управляемый напряжением (ГУН), частотно-фазовый детектор (ЧФД), схему накачки заряда, фильтр низких частот с  $RC$ -элементами и делитель частоты в цепи обратной связи между выходом ГУН и входом частотно-фазового детектора (рис. 1). Для построения синхрогенераторов на основе цифровой ФАПЧ требуются новые структурные блоки с цифровым управлением: релаксационный генератор, управляемый цифровым кодом (ГУК), цифровой фильтр низких частот, апериодический цифровой частотно-фазовый детектор.

Основным критерием выбора структуры синхрогенератора с цифровой ФАПЧ является требуемое значение кратковременной нестабильности частоты — так называемого джиттера (*jitter* — уход, "дрожание" частоты). Так как цифровая система работает дискретно, то джиттер не может быть меньше одного дискрета перестройки генератора (единицы младшего разряда контролирующей сис-

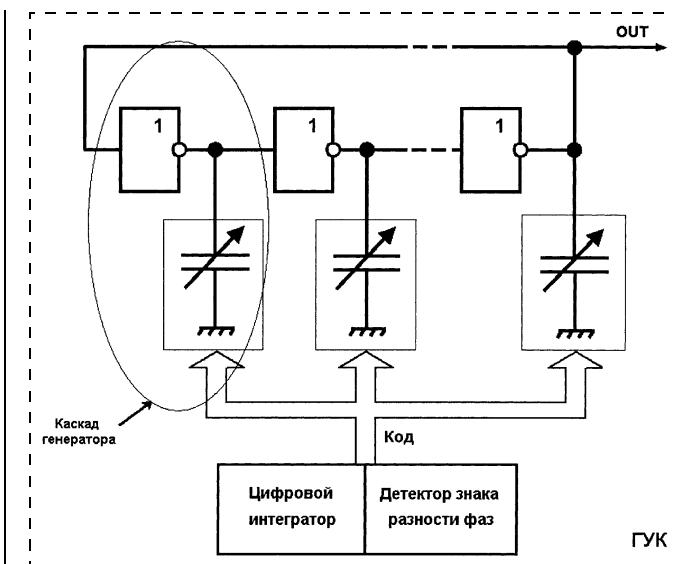


Рис. 2. Структурная схема генератора, управляемого цифровым кодом

темы управления). Для СФ-блоков в составе СНК достаточно иметь синхросигналы с джиттером порядка 3–5 %. Это обычное значение для цифровых систем. Вторым критерием выбора структуры является заданная номинальная частота синхросигнала.

**Генератор, управляемый цифровым "кодом".** Такой генератор построен на конденсаторах и цифровых логических вентилях. Значением емкости в нагрузках цифровых вентилей можно управлять, подключая дополнительные конденсаторы. Частота колебаний релаксационного кольцевого генератора определяется значением емкости, подключенной к каждому выходу цифрового вентиля. Минимальное изменение частоты определяется числом разрядов управляющего кода.

Структурная схема генератора, управляемого цифровым кодом, приведена на рис. 2.

Емкость конденсатора переменного значения задается кодом с выходов цифрового фильтра низких частот. Цифровой фильтр низких частот включает  $n$ -разрядный реверсивный счетчик и детектор знака разности фаз. При увеличении значения кода увеличивается число подключенных конденсаторов, что обеспечивает понижение частоты управляемого генератора.

Генератор, управляемый цифровым кодом, имеет линейную модуляционную характеристику зависимости периода выходных колебаний от значения кода. Но в общем случае линейность характеристики необязательна, важна только ее монотонность.

**Апериодический цифровой частотно-фазовый детектор.** Для того, чтобы предотвратить возбуждение паразитных колебаний в цепи обратной связи ФАПЧ, в цифровом синхрогенераторе исполь-

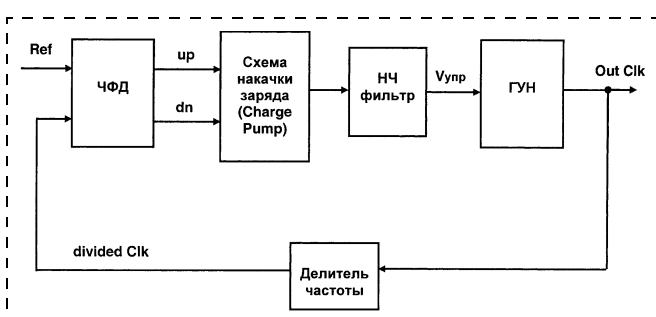
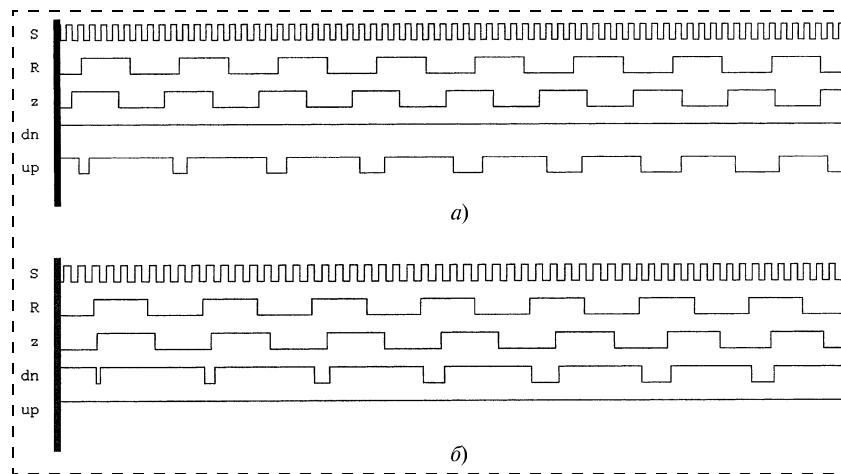


Рис. 1. Структурная схема интегрального синхрогенератора с ФАПЧ



**Рис. 3. Выходные сигналы частотно-фазового детектора:**  
а — выходные сигналы *up* ЧФД; б — выходные сигналы *dn* ЧФД

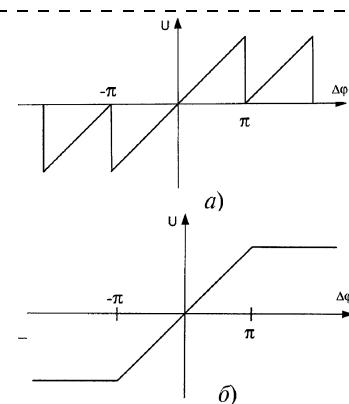
зуется частотно-фазовый детектор (ЧФД) с апериодической характеристикой, выдающий импульсы *up* (рис. 3, а), если деленная частота *z* опережает опорную *R* или *dn* (рис. 3, б), если деленная частота *z* отстает от опорной *R* (*S* — высокая частота управляемого генератора).

Если разность фаз сравниваемых сигналов опорной (*R*) и деленной (*z*) частот становится больше половины периода опорной частоты, ЧФД с периодической характеристикой (рис. 4, а) переводит выходной сигнал (*up* или *down*) в противоположное значение. Это затрудняет или делает невозможной работу детектора при отношении частот входных сигналов более двух и приводит к значительному увеличению времени захвата в системах фазовой и частотной автоподстройки частоты вследствие периодического снижения выходного сигнала детектора до нуля.

Апериодическая характеристика частотно-фазового детектора (рис. 4, б) означает, что когда разность фаз сравниваемых сигналов опорной (*R*) и деленной (*z*) частот становится больше половины периода опорной частоты, происходит ограничение выходного сигнала.

Структурная схема варианта реализации частотно-фазового детектора с апериодической характеристикой приведена на рис. 5.

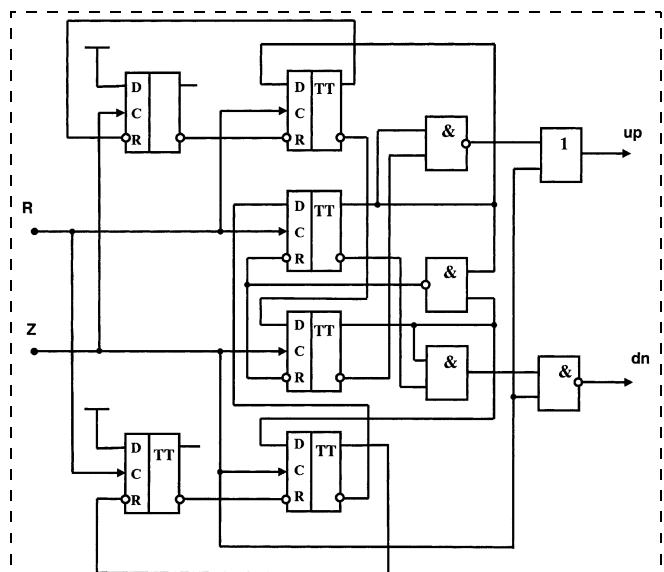
**Цифровой фильтр.** При построении ФАПЧ используются фильтры нижних частот второго и третьего порядка. С тем, чтобы создать отрицательную обратную связь в системе ФАПЧ, обычно применяют фильтры второго порядка — это включенные последовательно резистор и конденсатор. Они дают затухающую форму сигнала управления высокочастотным генератором (с выделением дифференциальных составляющих) (рис. 6).



**Рис. 4. Характеристики ЧФД:**

а — периодическая — при большой разнице частот (значение фазового сдвига больше половины периода) возникают биения; б — апериодическая — в схему ЧФД вводится внутренняя память — она запоминает его состояние при фазовом сдвиге больше периода, и хранит его

В блок цифрового фильтра для системы ФАПЧ входит цифровой интегратор и детектор знака разности фаз. Особенность интегратора — это дискретное изменение управляющего сигнала с мелким шагом, в отличие от аналоговых систем. Известны системы ФАПЧ с цифровым интегратором, содержащим реверсивный счетчик. Реверсивный счетчик переводит импульсы *up* и *dn* частотно-фазового детектора в код, применяемый для управления высокочастотным генератором. Отличием описываемой высокочастотной системы ФАПЧ является то, что цифровой код, хранящийся в реверсивном счетчике-интеграторе, непосредственно



**Рис. 5. Структурная схема варианта частотно-фазового детектора с апериодической характеристикой**

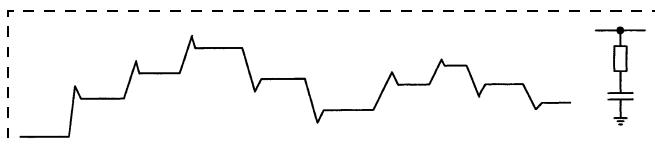


Рис. 6. Форма сигнала управления после фильтра второго порядка

но изменяет период генерации высокочастотного сигнала кольцевого генератора, выполненного в виде схемы с коммутируемыми конденсаторами. Вид сигнала управления на выходе цифрового фильтра показан на рис. 7. Эта кривая выражает собой суммарную изменяемую емкость всех ячеек перестраиваемого генератора.

В цифровом интеграторе предусмотрена схема ограничения, чтобы по достижению крайних значений кода (все нули или все единицы), он оставался в этом состоянии, и не происходило одновременного переключения всех разрядов кода, приводящее к нежелательной генерации в цепи обратной связи ФАПЧ.

Детектор знака разности фаз обрабатывает сигнал опорной частоты и сигнал деленной частоты и выдает сигнал знака разности фаз, дополнительно управляющий частотой колебаний высокочастотного генератора. Весовой коэффициент сигнала знака разности фаз рассчитывается так, чтобы его добавочного влияния на частоту генератора оказалось достаточно для быстрой сходимости системы. Обычно это 1,5 единицы младшего разряда кода (1,5-единичной постоянной емкости  $C_0$ , управляемой младшим разрядом реверсивного счетчика). Простой вариант схемы детектора знака разности фаз представляет собой обычный триггер-зашелку, в котором на входы установки и сброса подаются сигналы *up* на повышение или *dn* на понижение частоты с частотно-фазового детектора в составе цифровой ФАПЧ. Схема изображена на рис. 8.

К более сложным вариантам детектора знака разности фаз относится схема с разбиением полученного сигнала знака на разряды для более тонкого учета его влияния и более точной подстройки. Пример такой схемы приведен на рис. 9.

Здесь мы имеем три разряда сигнала знака, которые добавляются к сигналу от интегратора и воз-

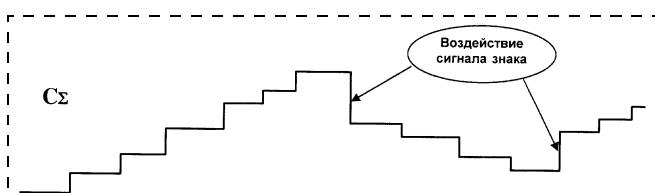


Рис. 7. Форма управляющего сигнала генератора после цифрового фильтра

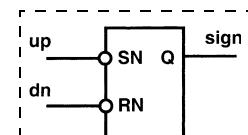


Рис. 8. Схема детектора знака разности фаз (простой алгоритм)

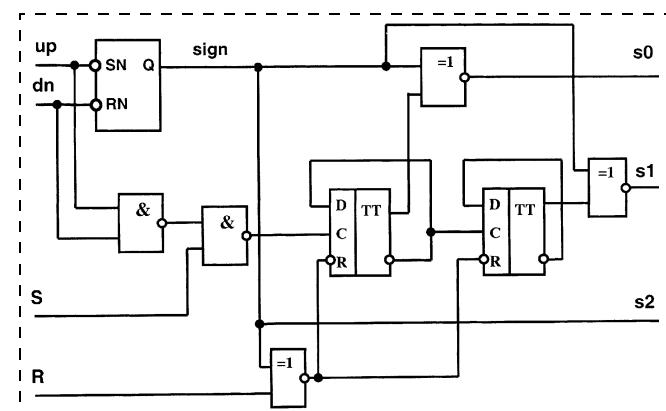


Рис. 9. Схема детектора знака разности фаз (сложный алгоритм)

действуют на частоту колебаний генератора, управляемого цифровым кодом. Весовые коэффициенты этих трех разрядов детектора при включении их в схему генератора составляют 1, 2 и 4 единицы младшего разряда кода для нулевого (*s0*), первого (*s1*) и второго (*s2*) разряда знака соответственно. *refClk* — сигнал опорной частоты, *HiClk* — сигнал высокой частоты управляемого генератора.

Расчет джиттера ЦФАПЧ при таком устройстве детектора показывает значительное улучшение параметров стабильности выходного сигнала по сравнению со схемой на простом алгоритме определения знака. Например, если при применении простого алгоритма для выходной частоты 500 МГц (период 2 нс) джиттер составил 60 пс, то после изменения схемы детектора на сложный алгоритм значение джиттера уменьшилось до 18 пс. При этом время вхождения ЦФАПЧ в захват существенно не увеличилось.

### Блок синхронизации входных данных

При использовании многоразрядной шины данных тактовый синхросигнал (СС) обычно передается по одной из линий шины. В этом случае частота тактового синхросигнала в несколько раз меньше частоты внутреннего синхросигнала СФ-блока. Так как СФ-блок работает только со своим синхрогенератором, то требуется совмещение фронтов внутреннего сигнала записи данных и внешнего тактового СС. Схема блока, реализующая эту функцию, включает трехфазный детектор и программируемый делитель частоты (рис. 10). Фазы сигнала записи берутся с выходов делителя частоты и устанавливаются через половину периода высокочастотного СС. Принцип работы трех-

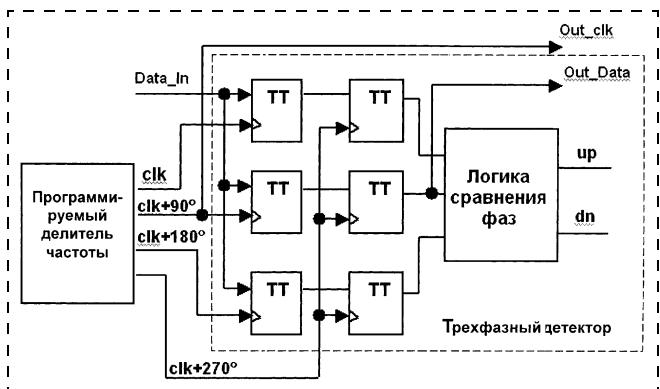


Рис. 10. Структурная схема блока совмещения фронтов внутреннего сигнала записи данных и внешнего тактового СС

фазного детектора поясняется рис. 11. Детектор управляет коэффициентом деления внутреннего СС и отслеживает положение рабочего фронта сигнала записи с точностью до половины периода СС.

При последовательной передаче данных с высокой частотой не удается обеспечить требуемую минимальную разницу задержек в линиях тактового СС и данных, поэтому линия передачи всего одна, а сигнал данных закодирован так, что несет в своей структуре информацию о тактовом сигнале. В кодированном сигнале на заданном отрезке времени всегда присутствуют переключения, по которым и

осуществляется синхронизация. Методов кодирования известно много, но все их можно охарактеризовать двумя параметрами: максимальным числом тактов сигнала без переключения и коэффициентом избыточности.

В блоке приема данных коррекция фазы сигнала записи проводится не на каждом такте, а на отрезке времени с переключением входного сигнала. Правильная работа блока фазовой коррекции возможна только в том случае, если минимальное значение фазовой коррекции много меньше периода сигнала записи. Если получать фазы СС делением частоты внутреннего синхрогенератора, то во многих случаях потребуется столь высокая частота, что ее не удастся реализовать доступными средствами.

Высокочастотный синхрогенератор формирует не менее четырех фаз выходного сигнала. Промежуточные значения фазового сдвига СС можно получить, используя элементы с программируемой задержкой (рис. 12). Элемент с программируемой задержкой включает две группы инверторов с третьим состоянием (высоким выходным импедансом). Входы каждой из групп инверторов объединены и подключены к одному из выходов синхрогенератора так, чтобы сдвиг фаз между ними составлял четверть периода СС. Выходной импеданс каждой из групп инверторов определяется управляющим кодом, т. е. числом активных инвер-

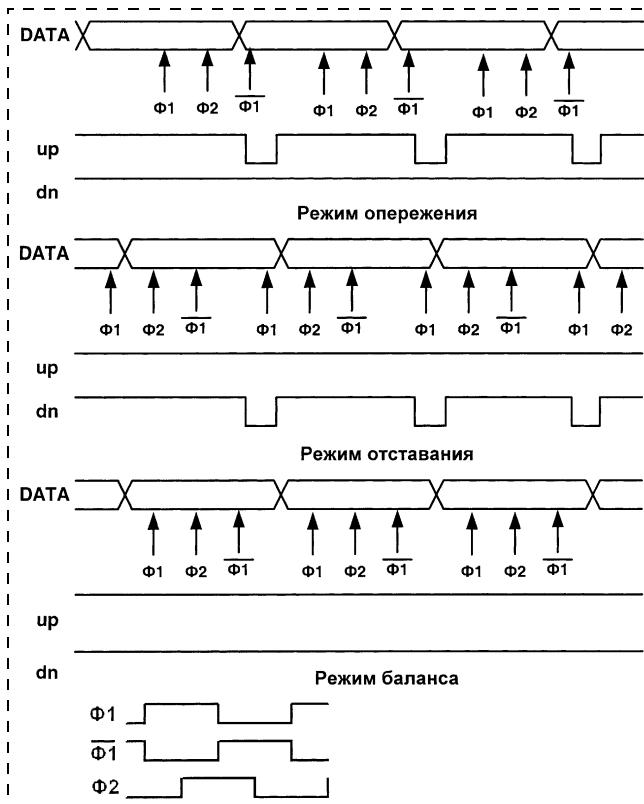


Рис. 11 Принцип работы трехфазного детектора

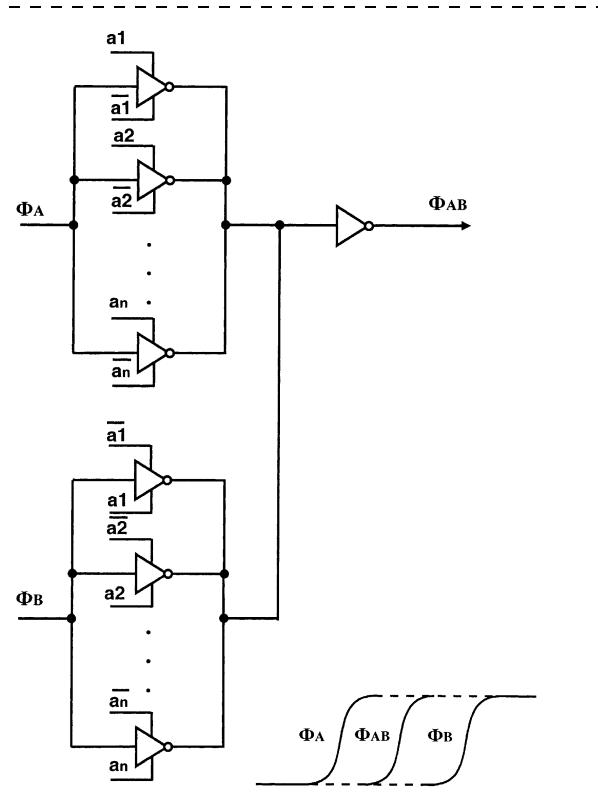


Рис. 12. Схема элемента с программируемой задержкой

торов. Задержка выходного сигнала зависит от соотношения выходных импедансов первой и второй групп инверторов. Код управления увеличивает выходной импеданс у одной группы и одновременно уменьшает у другой. Суммарная задержка элемента изменяется дискретно в соответствии с управляющим кодом в пределах четверти периода СС.

На основе элементов с программируемой задержкой строится блок синхронизации входных данных, включающий группу фазовращателей, трехфазный детектор и устройство управления (рис. 13, а и б). Блок синхронизации выдает последовательный поток данных и синхронизированный с этим потоком сигнал записи. Частота и фаза сигнала записи соответствуют частоте и фазе сигнала данных. Синхронизация фазовращателем эффективна, если частота внутренних синхросигналов приемника и передатчика отличается не более чем на 1 %.

### Адаптивные драйверы

Задержки импульсов в сигнальных проводниках определяются скоростью электромагнитной волны,  $RC$ -постоянной времени проводника и выходным сопротивлением драйвера. При компоновке и трассировке кристаллов СНК наиболее длинные и ответственные сигнальные цепи (синхросигналы и системные шины данных) реализуются в соответствии с принципом обратного масштабирования. Чем длиннее проводники, тем они шире, а переходные окна между уровнями металлизации дублируются для уменьшения сопротивления. В такой конструкции задержка импульса, связанная со скоростью электромагнитной волны и  $RC$ -параметрами проводника, не превышает 10 пс на 1 мм длины. Рассеянная емкость проводника составляет 100...150 фФ на 1 мм длины. При выходном сопротивлении драйвера 100 Ом и более задержка импульса определяется нагрузочной способностью драйвера. Типовое значение выходного сопротивления драйверов — 1 кОм.

Синхронная работа СФ блоков в СНК обеспечивается при определенных ограничениях на задержки сигналов в линиях связи. Возможны три варианта управления задержками сигналов в линиях связи: избыточное увеличение мощности драйверов, буферизация линий связи с использованием повторителей сигналов и применение адаптивных драйверов на выходах СФ-блоков. Первый вариант требует значительного увеличения потребляемой

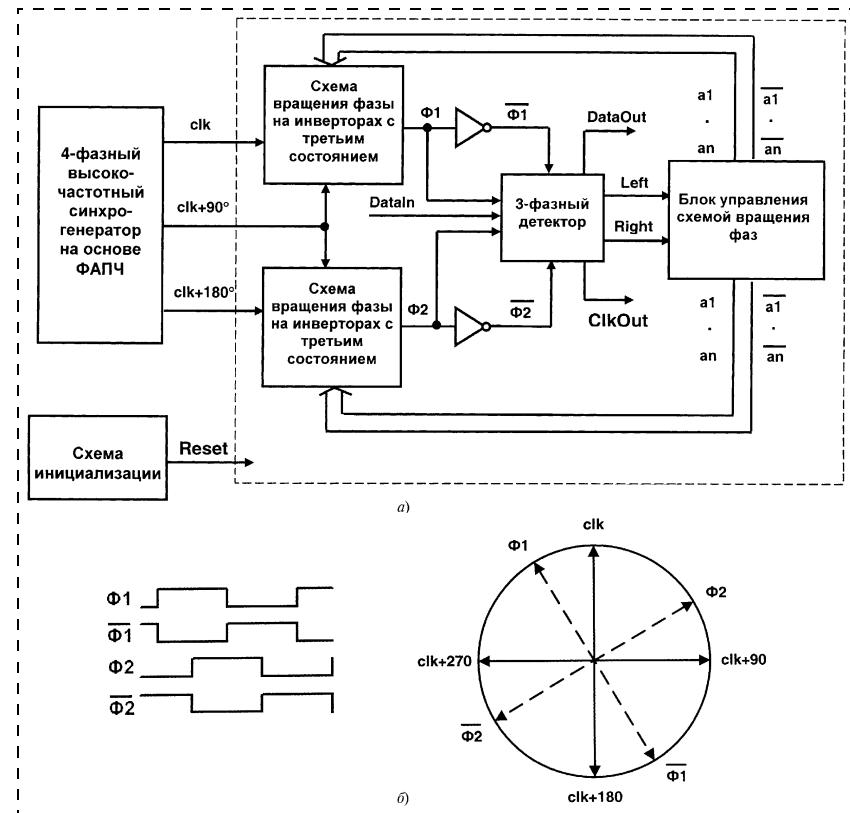


Рис. 13. Блок синхронизации входных данных:

а — схема; б — фазовая диаграмма, показывающая соотношение исходных четырех фаз с синхрогенератора и полученных четырех фаз на выходах схем вращения фазы

электрической мощности. Второй вариант технически сложен и требует создания отдельной системы питания повторителей в поле сигнальных проводников. Оптимальным можно считать третий вариант, обеспечивающий минимально необходимую мощность драйверов и отсутствие дополнительных активных элементов в промежутках между СФ-блоками.

Принцип действия адаптивного драйвера состоит в том, чтобы формировать одинаковые фронты и соответствующие им задержки распространения сигнала между СФ-блоками в СНК вне зависимости от емкости нагрузки.

Для решения проблемы распространения сигналов между СФ-блоками в СНК разработана структура адаптивного драйвера с управляемым импедансом. Схема такого адаптивного драйвера приведена на рис. 14.

Драйвер с управляемым выходным импедансом построен на реверсивном счетчике и управляемых инвертирующих буферах с третьим состоянием. В схеме физически присутствует опорный элемент, формирующий эталонный фронт. Опорный элемент включает драйвер с наименьшей нагрузочной способностью и эталонную емкостную нагрузку ( $C_{\text{эталон}}$ ). Такой же выходной фронт адаптивному драйверу необходимо сформировать незави-

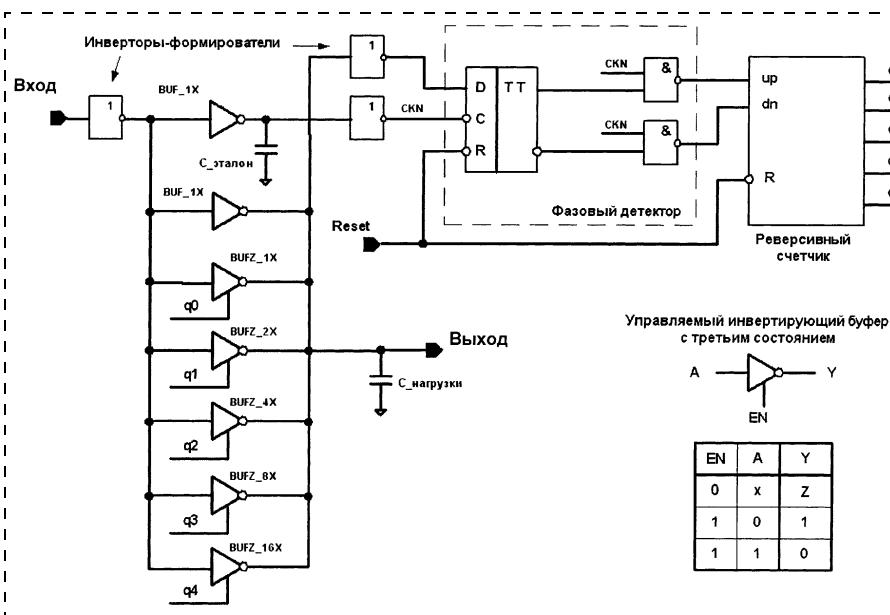


Рис. 14. Структура адаптивного драйвера с управляемым выходным импедансом

симо от внешней нагрузки ( $C_{\text{нагрузки}}$ ). Один драйвер минимальной нагрузочной способности всегда подключен к внешней нагрузке, а остальные способны подключаться или отключаться в зависимости от сигнала управления. Инвертор на входе блока формирует сигнал, который поступает разными путями на эталонный драйвер и эталонную нагрузку и одновременно на входы драйверов с изменяемой нагрузочной способностью (BUFZ\_1X, BUFZ\_2X, BUFZ\_4X, BUFZ\_8X, BUFZ\_16X). Нагружочные способности элементов BUFZ\_1X, BUFZ\_2X, BUFZ\_4X, BUFZ\_8X, BUFZ\_16X нарастают в 2 раза по мере увеличения индекса. На выходах эталонного и рабочего каналов мы получаем сигналы, которые нагружены на эталонную ( $C_{\text{эталон}}$ ) и неизвестную ( $C_{\text{нагрузки}}$ ) емкости соответственно.

Эти два сигнала подаются на входы фазового детектора через инверторы-формирователи. Фазовый детектор выдает импульсы *up* или *dn*, в зависимости от того, какой сигнал поступает на него с опережением — эталонный или управляемый. Импульсы *up* и *dn* поступают на реверсивный счетчик, формирующий код, управляющий матрицей драйверов, с изменяемой нагрузочной способностью. Код открывает или переводит в третье состояние соответствующую группу буферов. Наконец в системе наступает баланс, т. е. задержка управляемого сигнала становится равной задержке эталонного. Поскольку данная система цифровая, то точность настройки остается на уровне влияния младшего разряда управляющего кода. Заранее неизвестная емкость ( $C_{\text{нагрузки}}$ ) не может быть меньше ( $C_{\text{эталон}}$ ). Диапазон регулировки адаптивного

драйвера с фазовым детектором определяется разрядностью управляющего кода. В схеме на рис. 14 использован 5-разрядный реверсивный счетчик — соответственно допустимое значение емкости нагрузки будет лежать в диапазоне:

$$C_{\text{эталон}} < C_{\text{нагрузки}} < 32 C_{\text{эталон}}.$$

Описанный адаптивный драйвер экономичен по мощности, занимает малую площадь на кристалле и использует преимущества цифровой технологии.

#### Блок инициализации (начальных установок)

Для корректной работы цифровых блоков синхрогенераторов и других цифровых блоков в СНК необходимо предусмотреть сигнал установки в начальный момент времени (при включении питания).

Система инициализации обычно реализуется отдельным СФ-блоком. В общем случае в СНК не предусмотрен внешний сигнал сброса в начальный момент работы системы. Схема инициализации может быть объединена с генератором опорной частоты, тогда сигнал начальной установки появляется при нарастании напряжения питания (при включении схемы), и сбрасывается по первому импульсу опорного синхросигнала (рис. 15).

Сигнал начальной установки в активном уровне блокирует несанкционированный синхросигнал в СНК. Пороговое устройство на выходе опорного генератора срабатывает (снимает сигнал начальной установки и подает опорный синхросигнал на ЦФАПЧ) только через несколько микросекунд после того, как на опорном кварцевом генераторе появилось напряжение питания. Таким образом, синхроимпульсы начинают поступать на входы тактируемых элементов СНК после того, как завершилась начальная установка, а генератор опорной частоты вошел в стационарный режим работы.

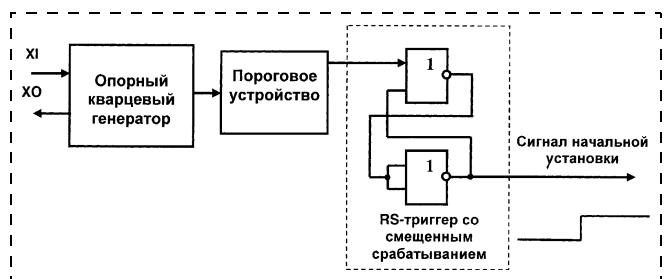


Рис. 15. Структурная схема блока инициализации

Схема инициализации прежде всего нужна для элементов с памятью (триггеров), входящих также в состав частотно-фазового детектора, реверсивного счетчика, детектора знака разности фаз и делителя. Сигнал начальной установки нужен и для всех других триггерных блоков СНК.

### Заключение

Эффективность использования вычислительных ресурсов электронной системы определяется эффективностью системы синхронизации информационных потоков.

Заказные микросхемы, оптимизированные для решения конкретных задач, обеспечивают наилучшие технические и производственные показатели изделий электронной техники. Новая методология проектирования заказных микросхем в виде "систем на кристалле" позволяет совместить преиму-

щества заказных и универсальных электронных систем — эффективное решение конкретных задач, а также отработанность и совершенство используемых блоков.

Совместная работа СФ-блоков на высоких частотах в составе СНК достигается только путем использования в этих СФ-блоках специальных устройств локальной синхронизации: генераторов, адаптивных драйверов и схем восстановления данных. Устройства локальной синхронизации являются высокочастотными аналого-цифровыми системами, схемотехника которых разработана пока недостаточно. Однако уже имеются практически реализуемые схемы и появляются новые эффективные решения. В ближайшем будущем проблема синхронизации СФ-блоков с рабочими частотами в несколько сотен мегагерц будет полностью решена.

# Конструирование и моделирование МСТ

УДК 621.3.049.77.002

**А. В. Козлов,**  
Московский государственный институт  
электронной техники (ТУ),  
**Р. Д. Тихонов,** канд. техн. наук,  
НПК "Технологический Центр" МИЭТ

## ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПО ТОКУ БИПОЛЯРНОГО МАГНИТОТРАНЗИСТОРА

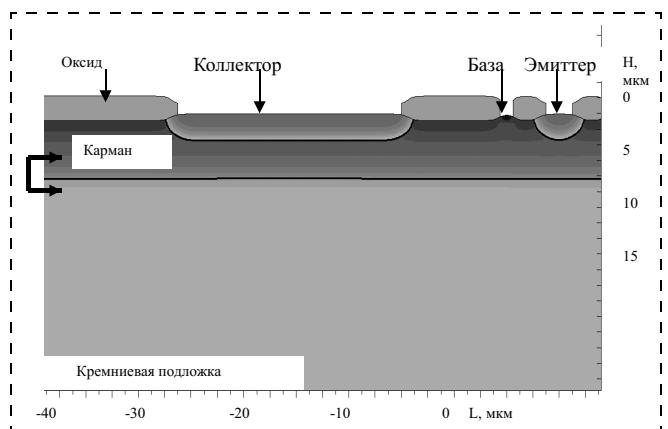
С помощью приборно-технологического моделирования исследован латеральный биполярный магнитотранзистор (БМТ), сформированный в кармане при внешнем соединении подложки с карманом. Показано, что в оптимизированной структуре БМТ происходит формирование потоков носителей заряда и их объемная рекомбинация, которые изменяются при воздействии магнитного поля. Возникновение концентрационно-рекомбинационной чувствительности БМТ дает обоснование механизму возникновения двух знаков относительной магниточувствительности по току. Выбор параметров структуры и режима работы БМТ в соответствии с установленным механизмом чувствительности позволяет повысить относительную чувствительность по току до  $30 \text{ Гл}^{-1}$ .

В биполярном магнитотранзисторе (БМТ), сформированном в кармане, при внешнем соеди-

нении подложки с карманом обнаружено явление отрицательной магниточувствительности [1], при котором разница напряжений на рабочих коллекторах в магнитном поле имеет другой знак по сравнению с БМТ, сформированным в подложке без кармана. Переход карман — подложка, который вводится для создания  $p-n$ -переходной изоляции БМТ от других элементов интегральной схемы, влияет на режим работы БМТ, так как служит третьим коллектором, в который уходит значительная часть инжектированных из эмиттера электронов и там происходит их рекомбинация с дырками [2—4].

Проведено исследование с помощью программ приборно-технологического моделирования фирмы ISE AG распределения концентраций электронов и дырок, а также скорости их рекомбинации в структуре двухколлекторного латерального  $n-p-n$  БМТ, сформированного в кармане  $p$ -типа проводимости на подложке  $n$ -типа.

Структура БМТ с указанием масштаба кристалла по глубине  $H$  и вдоль плоскости  $L$  представлена на рис. 1. Размеры и расположение электродов эмиттера, коллекторов, кармана и базовых контактов выбирались для обеспечения высокой чувствительности прибора. Длина всех электродов в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка, равна 80 мкм. Потенциал эмиттера считался равным нулю. Расчеты проводились при переменном напряжении на объединенных контактах к ба-



**Рис. 1. Структура биполярного двухколлекторного латерального магниточувствительного транзистора, сформированного в диффузионном кармане и с соединением контактов к подложке и к карману**

зе и к подложке. На рис. 1 условно показано их соединение. На коллекторы подавалось напряжение 1,5 В. Магнитное поле выбиралось в диапазоне магнитной индукции от 0,001 до 1 Тл с направлением вектора вдоль длинной стороны электродов.

Отличительными особенностями структуры *n-p*-транзистора, составленного из *n<sup>+</sup>* эмиттера, диффузионного *p*-кармана, служащего базой, подложки, служащей коллектором, и двух рабочих коллекторов, является достаточно большая длина базы. Длина базы между эмиттером и границей перехода карман — подложка 4 мкм. Размер базы между эмиттером и рабочими коллекторами 9 мкм. В работе транзистора с указанными относительно большими размерами активной и пассивной баз важную роль играет процесс рекомбинации инжектированных из эмиттера электронов и дырок, поступающих из контактов к базе. Рабочие коллекторы расположены дальше от эмиттера, чем переход карман — подложка, который служит третьим коллектором. На оси симметрии прибора концентрация инжектированных электронов значительно больше концентрации электронов, определяемой концентрацией донорной примеси в подложке ( $10^{15}$  см<sup>-3</sup>), поэтому подложка обогащается инжектированными электронами. Большая часть электронов определяет ток подложки, а до рабочих коллекторов доходит малая часть электронов, создающая ток рабочих коллекторов. Распределение дырок в приборе показывает, что концентрация дырок определяется уровнем легирования кармана акцепторной примесью и числом дырок, которые компенсируют заряд инжектированных электронов, обеспечивая электронейтральность в диффузионном кармане и в подложке.

Рекомбинация носителей тока по статистике Шокли—Рида—Холла определяется неравновесной концентрацией как электронов, так и дырок.

Пространственное расположение эмиттера и контактов к карману определяет то, что для обеспечения рекомбинации дырки создают поток из контактов к карману в сторону центра структуры, где протекает основной поток электронов. Потоки дырок из двух контактов к карману создают два потока дырок с двух сторон от оси симметрии потока электронов, причем направление всех трех потоков одинаковое — от поверхности прибора в глубину через карман в подложку.

Важно отметить, что при воздействии магнитного поля одинаково направленные потоки электронов и дырок под действием силы Лоренца отклоняются в разные стороны. Поток электронов при выбранном направлении магнитного поля отклоняется в активной базе влево от оси симметрии, а потоки дырок — вправо. Отклонение электронов влево должно приводить к увеличению тока левого рабочего коллектора и уменьшению тока правого рабочего коллектора, что определяет положительный знак магниточувствительности.

Однако кроме отклонения потока электронов происходит отклонение потоков дырок. Левый поток дырок при отклонении вправо идет навстречу потоку электронов, что определяет увеличение скорости рекомбинации в левой части прибора. Правый поток дырок при отклонении вправо расходится с потоком электронов, что определяет снижение скорости рекомбинации в правой части прибора.

Изменение распределения скорости рекомбинации мало даже в сильных магнитных полях, поэтому для определения этого изменения проведено вычитание скоростей рекомбинации, которые соответствуют наличию и отсутствию магнитного поля. Распределение разности скоростей рекомбинации  $\lg G$  представлено на рис. 2 (см. вторую сторону обложки). Объемная диаграмма распределения разности скоростей рекомбинации в диапазоне  $-10^{19} \dots +10^{19}$  см<sup>-3</sup> с<sup>-1</sup> наглядно демонстрирует, что в большой части кармана слева от оси симметрии скорость рекомбинации увеличивается, а справа падает.

Каким образом изменение скорости рекомбинации влияет на число электронов, поступающих к рабочим коллекторам, видно из разности концентрации электронов при воздействии магнитного поля и при его отсутствии. На рис. 3 (см. вторую сторону обложки) дано распределение в приборе разности концентраций электронов в диапазоне  $-10^{14} \dots +10^{14}$  см<sup>-3</sup>, из которого видно сильное изменение концентрации электронов вблизи эмиттера вдоль узкой полосы, прилегающей к оси симметрии. Слева от оси симметрии концентрация электронов увеличивается, а справа падает, т. е. проявляется действие силы Лоренца. Далее от оси симметрии концентрация электронов убывает за-

счет рекомбинации в сильно легированной области кармана, причем в левой части быстрее, а в правой медленнее.

Обращает на себя внимание изменение концентрации электронов вблизи границы перехода карман—подложка. Слева от оси симметрии напротив левого коллектора К1 в подложке наблюдается уменьшение концентрации электронов, а справа напротив правого коллектора К2 в подложке наблюдается увеличение концентрации электронов. Факт изменения концентрации электронов около рабочих коллекторов является определяющим для понимания объемного концентрационно-рекомбинационного механизма возникновения отрицательной магниточувствительности по току в БМТ.

Знание механизма работы БМТ позволяет оптимизировать структуру прибора. На рис. 4 приведены значения относительной чувствительности по току в виде трехмерной диаграммы в зависимости от приложенного напряжения между базой и эмиттером при выбранной дозе легирования кармана и расстоянии между эмиттером и рабочими коллекторами, которые определяют рекомбинацию носителей заряда. Как видно на рис. 4, относительная чувствительность по току достигает значения  $30 \text{ Тл}^{-1}$  при магнитной индукции 0,001 Тл.

Зависимость относительной чувствительности по току от индукции магнитного поля показывает, что данная структура БМТ обладает интересной особенностью увеличения чувствительности и даже изменения знака в магнитном поле с переменными значениями индукции. Такая зависимость важна при применении в устройствах, определяющих направление вектора магнитной индукции. При выборе направления, параллельного вектору, рост сигнала определенного знака происходит со сверхлинейной зависимостью, что позволяет точнее определить направление.

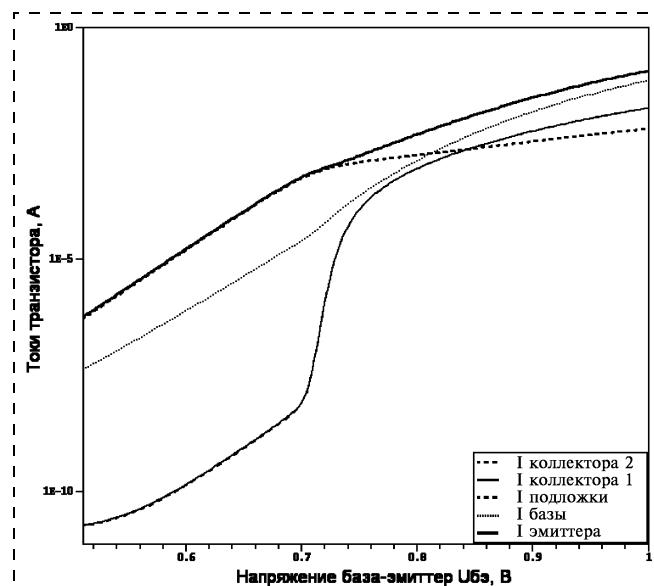


Рис. 5. Зависимость токов эмиттера, подложки, базы и коллекторов от напряжения база — эмиттер

Характерной особенностью данной структуры БМТ является пороговая чувствительность. Ток рабочих коллекторов начинает быстро расти при некотором значении напряжения база — эмиттер (рис. 5), когда уменьшается скорость роста токов эмиттера, подложки, а рост тока базы увеличивается.

Как следует из обзора литературы [5], в известных работах объемная рекомбинация носителей заряда не учитывалась при рассмотрении физических механизмов, определяющих работу БМТ. Проведенное исследование дает возможность утверждать, что возникновение отрицательной относительной чувствительности по току в биполярном двухколлекторном латеральном магниточувствительном транзисторе, сформированном в кармане, имеющем один потенциал с подложкой, определяется механизмом объемной рекомбинации потоков электронов и дырок.

Выбор структуры БМТ с определенными расстояниями между эмиттером и рабочими коллекторами и задание доз легирования кармана позволяют при учете концентрационно-рекомбинационного механизма магниточувствительности повысить относительную чувствительность по току до  $30 \text{ Тл}^{-1}$ , что намного превышает известные ранее значения до  $4 \text{ Тл}^{-1}$ . Применение биполярного двухколлекторного латерального магниточувствительного транзистора, сформированного в кармане, имеющем один потенциал с подложкой, в высоко чувствительных датчиках магнитного поля открывает возможности расширения областей его применения.

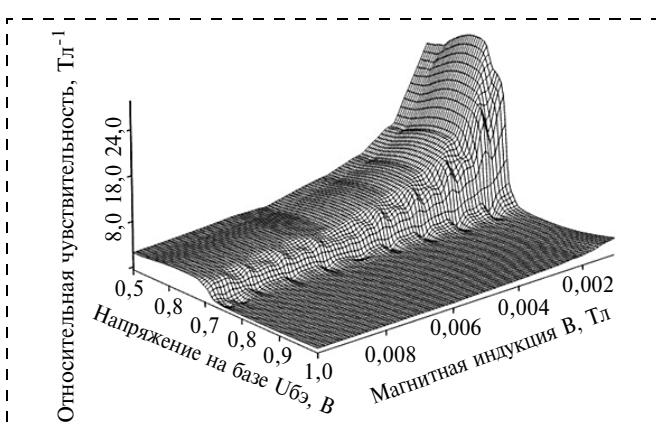


Рис. 4. Зависимость относительной чувствительности по току от напряжения между эмиттером и базой-подложкой и магнитной индукции от 0,001 до 0,01 Тл

**Список литературы**

1. Королев М. А., Чаплыгин Ю. А., Амеличев В. В., Тихонов Р. Д., Шорин М. В. Исследование возможности повышения чувствительности биполярных латеральных магниточувствительных транзисторов // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2002. № 1. С. 40—43.
2. Амеличев В. В., Галушкин А. И., Миргородский Ю. Н., Тихониров П. А., Чаплыгин Ю. А., Шорин М. В., Щубин С. В. Моделирование биполярного двухколлекторного магнитотранзистора и определение режима термокомпенсации изменения чувствительности // Датчики и системы. 1999. № 6. С. 38—42.
3. Амеличев В. В., Галушкин А. И., Зубенко Ф. Г., Чаплыгин Ю. А. Биполярный магнитотранзистор, изготовленный по самосовмещенной КМОП-технологии // Электронная промышленность. 1992. № 3. С. 58—59.
4. Козлов А. В., Королев М. А., Смирнов С. Ю., Чаплыгин Ю. А., Тихонов Р. Д. Исследование механизмов преобразования и относительной магниточувствительности трехколлекторного биполярного магниточувствительного транзистора // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 3. С. 219—225.
5. Козлов А. В., Ревелева М. А., Тихонов Р. Д. Механизм возникновения отрицательной относительной чувствительности по току латеральных биполярных магниточувствительных транзисторов // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2003. № 5. с. 57—62.
6. Бараночников М. Л. Микромагнитоэлектроника М.: ДМК Пресс, 2001.

УДК 621.3.049.77.001.2

**И. В. Кравченко,  
Б. Г. Коноплев, д-р техн. наук., проф.,  
Е. А. Рындин, канд. техн. наук., доц.**  
Таганрогский государственный радиотехнический  
университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В КОНВЕКТИВНОМ МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРЕ

*Разработана модель для расчета распределения температуры в конвективном микроакселерометре. Исследовано влияние размеров камеры, температуры нагревателя на линейность и чувствительность микроакселерометра.*

### Введение

Микроакселерометры относятся к одному из важнейших классов интегральных инерционных сенсоров. На сегодняшний день микроакселерометры занимают второе место по объему продаж после сенсоров давления. Это обусловлено их широким применением в автомобильной, авиационной технике и в других отраслях промышленности [1, 2].

Тепловые акселерометры являются относительно новым видом акселерометров. Их работа основана на отклонении конвекционного потока газа в герметичной камере под действием внешнего ускорения. Тепловые акселерометры не имеют подвижных механических частей. В них эталонную массу заменяет нагретый поток газа. Тепловые микроакселерометры состоят из термоизолированного нагревателя, который формирует конвективный поток газа, и сенсоров температуры, расположенных симметрично от нагревателя (рис. 1). Нагреватель и датчики помещены в герметичную камеру. Распределение температуры в газе изменяется при

приложении ускорения и становится асимметричным по отношению к нагревателю, что регистрируется двумя сенсорами температуры. Разность значений, полученных с сенсоров, пропорциональна ускорению.

В качестве сенсоров температуры в конвективных микроакселерометрах используется как термопара, так и терморезисторы [1, 2].

Тепловые акселерометры позволяют также измерять и угол наклона по отношению к горизонту в пределах от  $-90$  до  $+90$ °, т. е. могут использоваться как инклинометры. Диапазон измеряемого ускорения составляет до  $10\text{ g}$  при погрешности менее 2 % и максимальной частоте порядка 100 Гц [2].

Главными достоинствами акселерометров, основанных на конвекции, являются конструктивная и технологическая простота, и также отсутствие эталонной массы, что обуславливает значительные допустимые перегрузки без повреждения прибора.

### Модель акселерометра

На рис. 2 представлена схематическая модель поперечного сечения герметичной камеры теплового микроакселерометра.

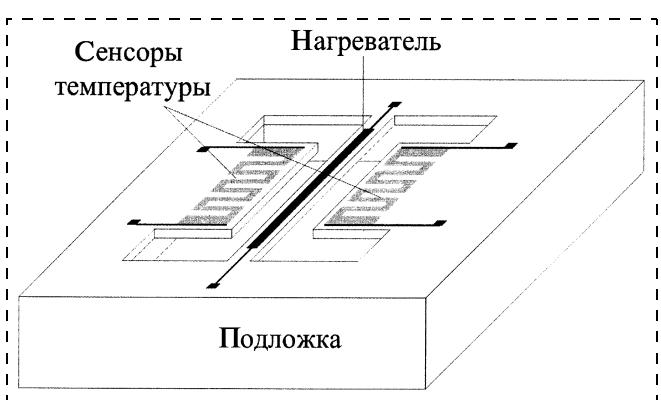
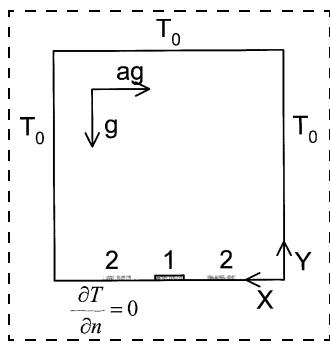


Рис. 1. Конструкция термоакселерометра



**Рис. 2. Модель поперечного сечения герметичной камеры микроакселерометра:**  
1 — источник тепла; 2 — сенсоры температуры

Условие возникновения конвекции в микрокамере будет описываться следующим выражением [3]:

$$gh/c^2 \ll (T_h - T_0)\beta, \quad (1)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $h$  — высота камеры;  $c$  — скорость звука;  $T_h$  — температура нагревателя;  $T_0$  — температура стенок камеры;  $\beta$  — температурный коэффициент расширения газа.

Для расчета распределения температуры в газе, заполняющем камеру, была использована система уравнений, которая состоит из уравнения Навье—Стокса в приближении Буссинеска, уравнения теплопроводности и уравнения непрерывности. Для стационарного случая эти уравнения имеют следующий вид [3]:

$$(\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} = -\nabla \frac{\rho'}{\rho_0} + \eta\Delta\mathbf{v} - \mathbf{g}\beta T'; \quad (2)$$

$$\mathbf{v}\nabla T' = \chi\Delta T'; \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad (4)$$

где  $\mathbf{v}$  — скорость потока газа;  $\eta$  — кинематическая вязкость;  $\chi$  — температуропроводность;  $T$  — температура газа;  $T' = T - T_0$  — перегрев газа относительно стенок камеры;  $\rho_0$  — плотность газа при  $T_0$ ;  $\rho'$  — изменение давления газа;  $\Delta$  — оператор Лапласа;  $\nabla$  — набла-оператор.

Поскольку скорость потока газа мала (порядка  $10^{-3}$  м/с), в уравнении Навье—Стокса (2) можно пренебречь изменением давления, а также членом, содержащим скорость в квадрате. Введем в уравнение (2) измеряемое ускорение, которое представим в виде коэффициента  $a$ , умноженного на ускорение свободного падения. С учетом изложенного выше уравнение (2) примет следующий вид:

$$\eta\Delta\mathbf{v} + a\mathbf{g}\beta T' = 0. \quad (5)$$

Нормировку системы (2)–(4) осуществляют с использованием следующих коэффициентов:

$$\mathbf{v} = \bar{\mathbf{v}} \frac{\eta}{h}; \quad (6)$$

$$T' = \bar{T}(T_h - T_0), \quad (7)$$

где  $\bar{\mathbf{v}}$ ,  $\bar{T}$  — нормированные величины.

После подстановки в систему уравнений (3)–(5) выражений с нормировочными коэффициентами (6), (7), уравнения примут вид:

$$\Delta\bar{\mathbf{v}} + a\operatorname{Gr}\bar{T} = 0; \quad (8)$$

$$\operatorname{Pr}\bar{\mathbf{v}}\nabla\bar{T} = \Delta\bar{T}; \quad (9)$$

$$\operatorname{div}\bar{\mathbf{v}} = 0, \quad (10)$$

где  $\operatorname{Gr} = g\beta(T_h - T_0)h^3/\eta^2$  — число Грассгофа;  $\operatorname{Pr} = \eta/\chi$  — число Прандтля [3].

Система (8)–(10) решалась со следующими граничными условиями:

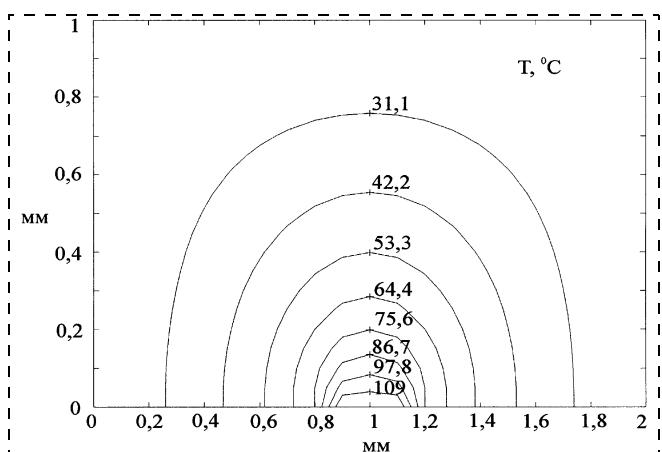
- скорость газа на стенах камеры равна нулю [3];
- на верхней и боковых стенках температура постоянна и равна  $T_0$ ;
- нижняя стенка теплоизолирована, т. е.  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ .

Численное решение системы (8)–(10) было проведено на равномерной сетке, для воздушной среды в объеме микрокамеры при следующих параметрах:

- температура окружающей среды  $T_0 = 20$  °C;
- температура нагревателя  $T_h = 120$  °C (см. рис. 3–11);
- высота камеры  $h = 1$  мм (см. рис. 3–10, 12);
- ширина камеры  $w = 2$  мм (см. рис. 3–7, 8, a, 9, 10, 12);
- коэффициент объемного расширения воздуха  $\beta = 0,003661$  1/K;
- кинематическая вязкость  $\eta = 1,4109 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с;
- температуропроводность  $\chi = 2,6121 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с.

### Результаты моделирования

На рис. 3 представлены результаты численного моделирования распределения температуры внутри микрокамеры без учета конвекции.



**Рис. 3. Распределение температуры внутри микрокамеры без учета конвекции**

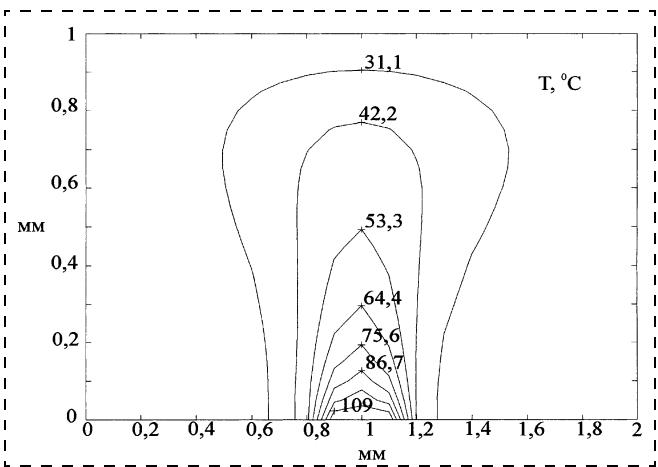


Рис. 4. Распределение температуры внутри микрокамеры с учетом конвекции ( $a = 0$ )

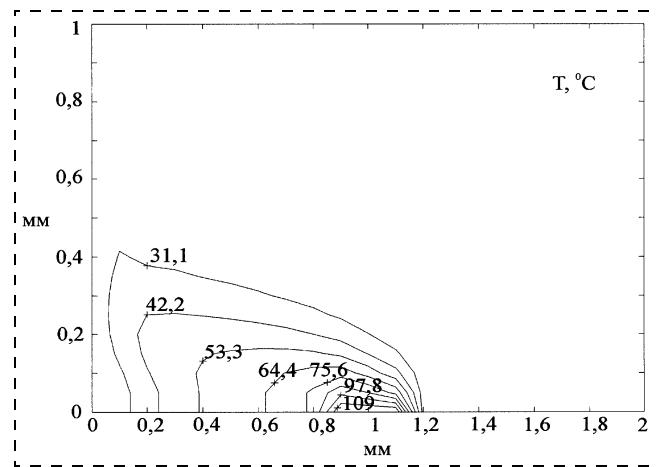


Рис. 7. Распределение температуры внутри микрокамеры при боковом ускорении ( $a = 8 \text{ g}$ )

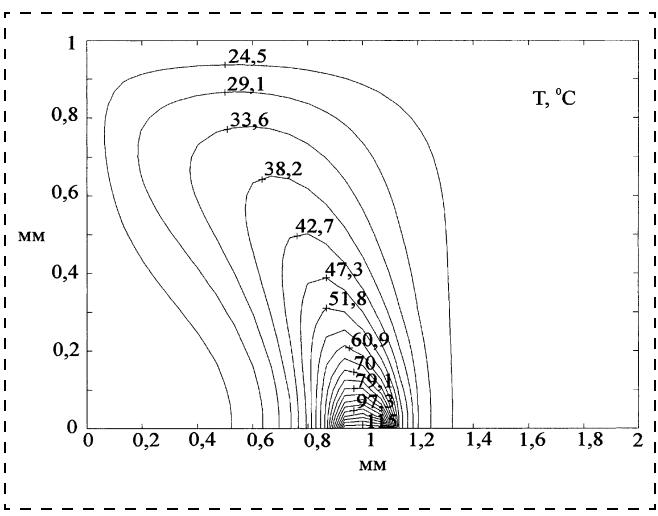


Рис. 5. Распределение температуры внутри микрокамеры при боковом ускорении ( $a = 0,5 \text{ g}$ )

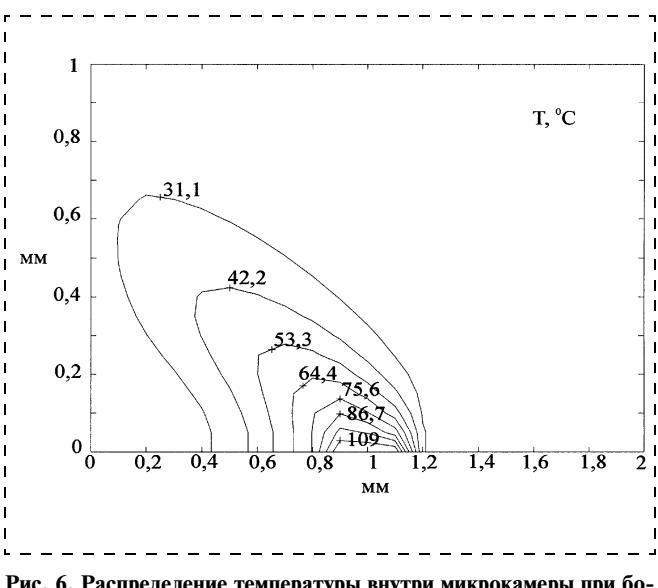


Рис. 6. Распределение температуры внутри микрокамеры при боковом ускорении ( $a = 2 \text{ g}$ )

ри микрокамеры без учета конвекции. Для этого в уравнении (9) скорость была принята равной нулю.

На рис. 4 представлены результаты моделирования распределения температуры внутри микрокамеры с учетом конвекции. На рис. 5–7 представлены результаты моделирования с учетом различного бокового ускорения.

На рис. 8 дана зависимость температур  $dT$ , регистрируемой сенсорами в микрокамере, от приложенного ускорения и расстояния от нагревателя до сенсоров температуры. На рис. 9 представлена зависимость разности температур  $dT$  от угла наклона относительно горизонта и расстояния от нагревателя до сенсоров температуры.

На рис. 10 приведена зависимость относительной разности температур, регистрируемой сенсорами, от угла наклона  $\phi$  относительно горизонта при расстоянии от нагревателя до сенсоров 400 мкм. Для сравнения приведен экспериментальный график зависимости выходного напряжения от угла наклона [1]. Данный график показывает, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в литературе.

Из рис. 8, 9 следует, что максимальной разности температур, фиксируемой сенсорами, соответствует расстояние от нагревателя до сенсоров 300...500 мкм. При увеличении ширины камеры и сохранении постоянными высоты и температуры нагревателя расстояние от нагревателя до сенсоров, соответствующее максимуму разности температур, смещается к 500 мкм (рис. 8, б) и при дальнейшем увеличении ширины остается практически неизменным. Увеличение ширины камеры приводит к увеличению разности температур при постоянном значении температуры нагревателя, однако зависимость разности температур от ускорения становится нелинейной (см. рис. 8, б).

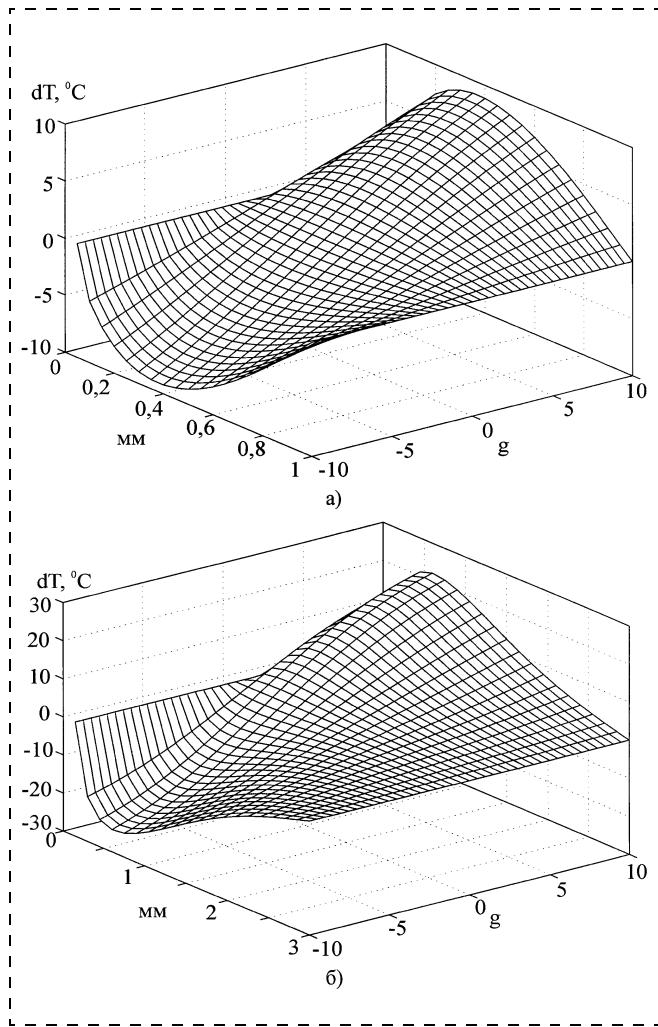


Рис. 8. Зависимость разности температур, регистрируемой сенсорами, от приложенного ускорения и расстояния от нагревателя до сенсоров при  $T_h = 120^\circ\text{C}$ ,  $h = 1 \text{ мм}$ :

$a$  —  $w = 2 \text{ мм}; b$  —  $w = 6 \text{ мм}$

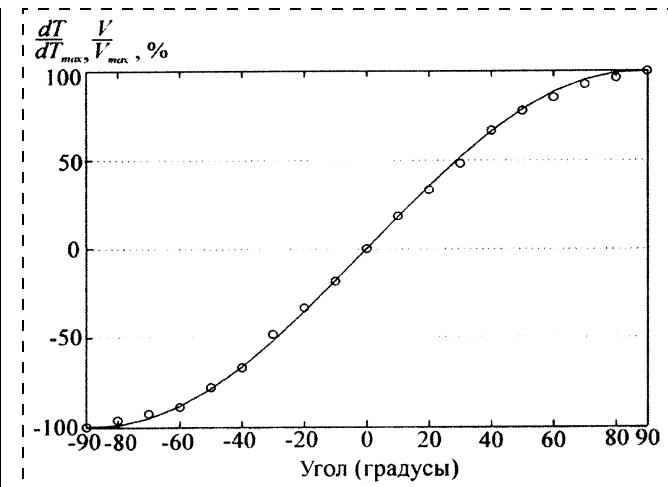


Рис. 10. Зависимость разности температур, регистрируемой сенсорами, от угла наклона:

○ — экспериментальные данные; — — расчетные данные

При увеличении высоты камеры и сохранении постоянным отношения высоты к ширине (1:2) также возрастает разность температур, регистрируемая сенсорами, и увеличивается нелинейность зависимости разности температур от ускорения (рис. 11). Зависимость разности температур от ускорения также становится нелинейной при увеличении температуры нагревателя (рис. 12).

Из приведенного выше следует, что возрастание числа Грассгофа  $\text{Gr} = g\beta(T_h - T_0)h^3/\eta^2$  соответствует увеличению нелинейности характеристик акселерометра (рис. 11, 12). Особенно сильно на линейность характеристик влияют ширина и высота камеры (рис. 11), поскольку число Грассгофа имеет кубическую зависимость от размеров камеры. Увеличение температуры нагревателя так-

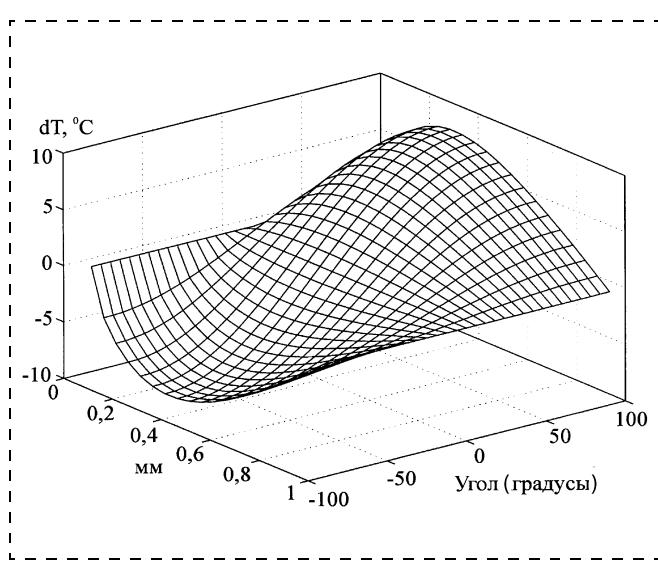


Рис. 9. Зависимость разности температур, регистрируемой сенсорами, от угла наклона и расстояния от нагревателя до сенсоров

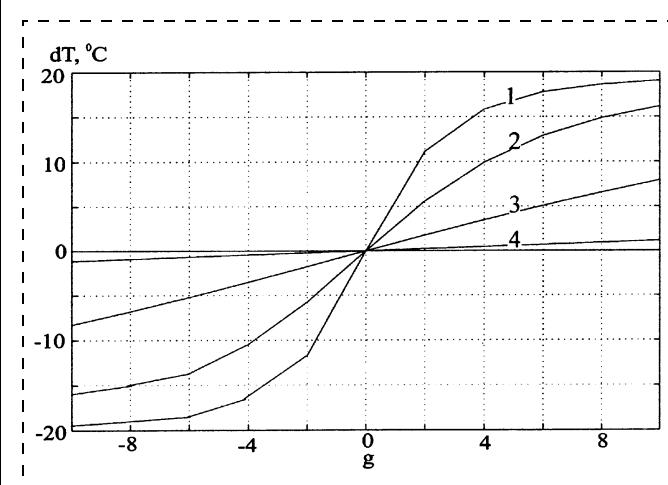
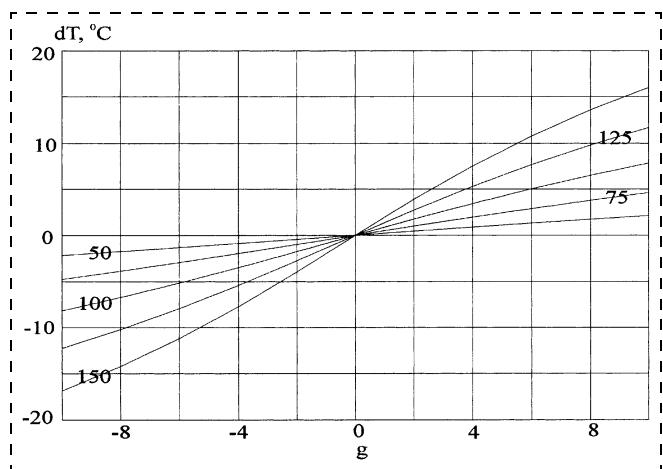


Рис. 11. Зависимость разности температур, регистрируемой сенсорами, от приложенного ускорения при различной высоте камеры:

1 —  $h = 0,1 \text{ мм}, \text{Gr} = 1,8e-5$ ; 2 —  $h = 0,5 \text{ мм}, \text{Gr}$ ; 3 —  $h = 1 \text{ мм}, \text{Gr} = 18,3$ ; 4 —  $h = 2 \text{ мм}, \text{Gr} = 144,2$



**Рис. 12.** Изменение разности температур, регистрируемой сенсорами, под действием ускорения при различной температуре нагревателя

же будет приводить к нелинейности (рис. 12). Однако уменьшение температуры нагревателя приведет к уменьшению разности температур под действием ускорения, а следовательно, и к снижению

чувствительности акселерометра. На разность температур между датчиками влияет не только температура нагревателя, но также и размеры камеры (см. рис. 11). Увеличение размеров камеры при постоянной температуре нагревателя приводит к увеличению разности температур и, следовательно, чувствительности акселерометра. На разность температур между датчиками также влияет их расположение относительно нагревателя.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ (проект 208.04.01.009 в рамках программы "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники"; грант ТО2-02.3-823, раздел "Электроника и радиотехника").*

#### Список литературы

1. Milanovic V., Bowen E., Tea N., Suehle J., Payne B., Zaghoul M. E., Gaitan M. Convective-based accelerometers and tilt sensors implement in standart CMOS // URL: <http://mems.nist.gov>.
2. Allan R. Heat Convection Yields Integrated CMOS MEMS Accelerometer // URL: <http://www.findarticles.com>.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Учеб. пособ. для вузов. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2001. С. 736.

## НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 548.73

**В. В. Аристов<sup>1</sup>, чл.-корр. РАН, А. В. Куюмчан<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, А. Ю. Суворов<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, Т. Ishikawa<sup>2</sup>, А. А. Исоян<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, К. Т. Труни<sup>3</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф., Е. Sarkisian<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт проблем технологий микроэлектроники РАН, г. Черноголовка МО,

<sup>2</sup> Spring-8/JASRI, 1-1-1 Kouto, Japan

<sup>3</sup> International Academy of Science and Technology, USA

### ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФУРЬЕ-ГОЛОГРАММЫ С ПОМОЩЬЮ ФАЗОВОЙ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКИ ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены экспериментальные результаты регистрации Габоровской голограммы для жесткого рентгеновского излучения и передачи голографического изображения с помощью фазовой зонной пластинки из кремния. Исследования проводились на станции BL29XU, Spring-8 при энергии рентгеновского излучения от 8 до 18 кэВ. В качестве тестового объекта использовались кристаллические буквы.

#### Введение

Развитие рентгеновской оптики открывает новые возможности для диагностики в области биологии, микроэлектроники и

нанотехнологий. В последние годы, с появлением синхротронных источников нового поколения и новых технологий изготовления оптических элементов, быстро развиваются методы рентгенов-

ской голографии и передачи изображения фазово-амплитудных объектов в жестком рентгеновском диапазоне излучения [1–6]. В данной работе приведены экспериментальные результаты регистрации Габоровской голограммы для жесткого рентгеновского излучения и передачи голографического изображения с помощью фазовой зонной пластинки (ЗП) из кремния [7].

#### Схема эксперимента и результаты

Исследованы изображения от тестового объекта, которые состоят из словосочетания "X-RAY phase contrast, IPMT RAS CHERNOGOLOVKA". Кристаллические тестовые объекты были изготовлены на кремниевых мембранных, толщиной 4 мкм с помощью электронно-лучевой литографии и ионно-плазменного травления. Ширина букв равна 2 мкм, а высота в одном случае — 3 мкм, в

другом — 1,5 мкм (рис. 1, а). Коеффициент пропускания рентгеновского излучения при энергии 12,4 кэВ составляет 98,9 % для 3 мкм и 99,4 % для 1,5 мкм.

Экспериментальные исследования проводились на станции BL29XU, Spring-8, Япония [8]. Рассматривались две разные экспериментальные схемы:

1) для получения Габоровской голограммы при энергии рентгеновского излучения от 8 до 18 кэВ (рис. 1, б);

2) для передачи голографического изображения при энергии рентгеновского излучения 10 кэВ (рис. 1, в).

В обоих случаях рентгеновский пучок синхротронного излучения от источника с вертикальным размером 25 мкм монохроматизировался с помощью двухкристального монохроматора Si(111) так, что  $\Delta E/E \approx 10^{-4}$ . Далее излучение распространялось свободно до тестового объекта, который был установлен на расстоянии 987,35 м перпендикулярно к падающему рентгеновскому пучку. После тестового объекта сформированное интерференционное изображение регистрировалось с помощью рентгеновской ССД-камеры (C5333, Hamamatsu Co.) [9]. Пространственное разрешение рентгеновской камеры составляло 0,3 мкм. Изображения регистрировались на расстояниях от 0,03 до 3 м от тестового объекта. Изображения тестового образца при энергии падающего пучка 12,4 кэВ показаны на рис. 2, а и б. Из рисунков видно, что контраст изображения изменяется в зависимости от расстояния. Как показывают экспериментальные данные, заметный контраст (несколько процентов от средней интенсивности) на изображениях появляется, начиная с некоторого расстояния от тестового объекта (например, для энергии 12,4 кэВ это расстояние составляет 25 мм).

Формирование рентгеновского контраста в полученных изображениях можно интерпретиро-

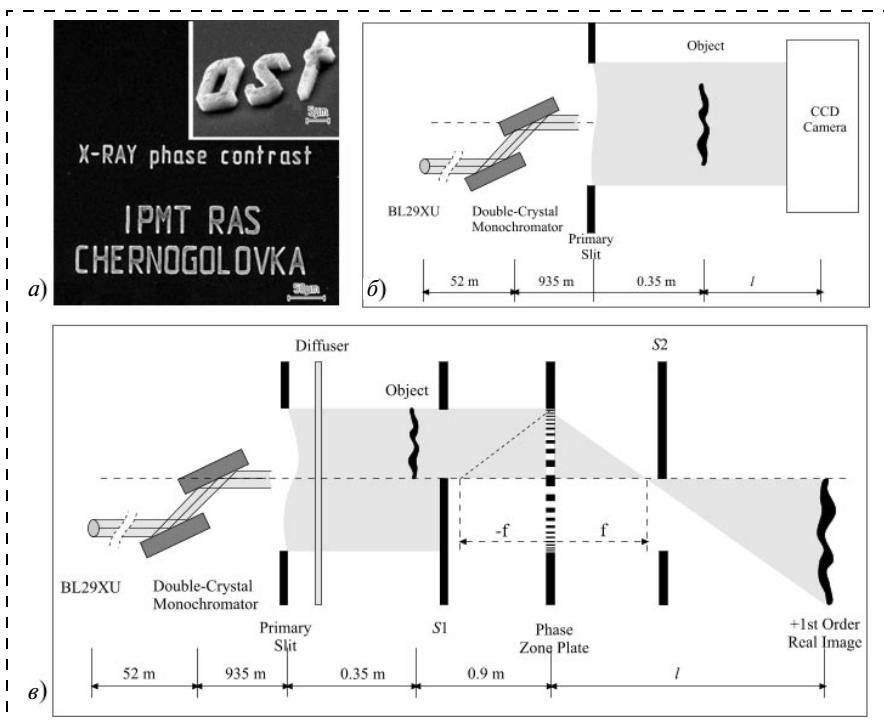


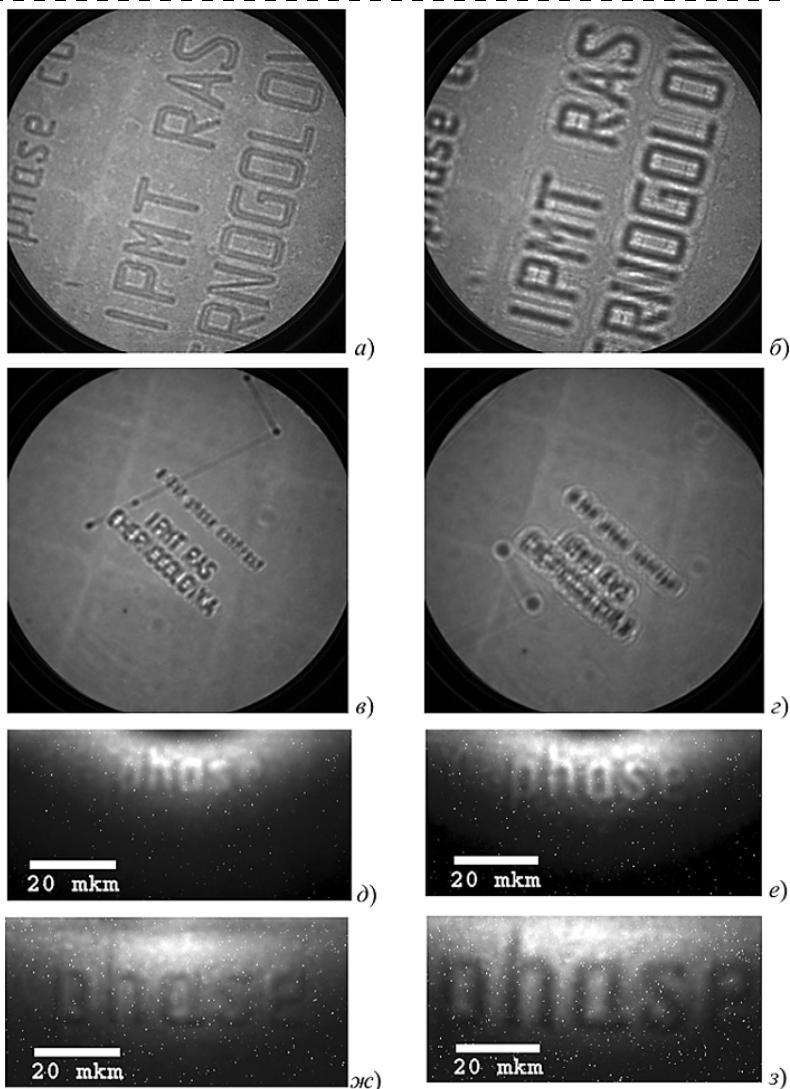
Рис. 1. Исследования изображений:

а — РЭМ-изображения от текстового объекта; б — схема эксперимента для получения голограммы; в — схема эксперимента для передачи голографического изображения

вать, пользуясь классической оптической теорией формирования изображения слабых фазовых объектов (см. например [10]) в когерентном излучении. Для сравнения полученных результатов с изображениями в некогерентном освещении были сделаны дополнительные эксперименты: получены изображения от фазового тестового объекта с диффузором. Диффузор был сделан в виде врашающегося диска из тонкой шлифовальной бумаги с размером зерна порядка 10–20 мкм. Скорость вращения была около 200 об/мин. Диск вставлялся в падающий рентгеновский пучок на расстоянии около 0,5 м перед объектом. Таким образом, нестационарное случайное пространственное изменение фазы в падающем пучке должно было привести к снижению степени когерентности и ухудшению контраста изображения. Экспериментальные исследования показали, что диффузор понижает контраст интерференционных изображений, но не убирает его полностью.

При повышении энергии падающего рентгеновского пучка от 8 до 18 кэВ контраст изображений с диффузором улучшался.

Во втором случае (см. рис. 1, в) исследовалась передача изображения тестового объекта с помощью фазовой ЗП в частично когерентном освещении. При этом падающее излучение с энергией 10 кэВ предварительно модулировалось диффузором, затем проходило через тестовый объект, коллимировалось щелью S1 шириной и высотой 160 × 90 мкм и попадало на фазовую ЗП. После ЗП рентгеновский пучок частично перекрывался с помощью щели S2 размерами 150 × 80 мкм и затем регистрировался рентгеновской камерой. Коллимирующие щели были необходимы для того, чтобы убрать влияние нулевого дифракционного порядка ЗП и тем самым повысить контраст получаемых изображений. Параметры используемой ЗП [5]: радиус первой зоны — 8,42 мкм, число зон — 112, размер последней зоны — 0,4 мкм, апертура —



**Рис. 2. Экспериментальные результаты:**

а — голограммическое изображение от текстового объекта на расстоянии  $l = 75$  мм; б — то же на расстоянии  $l = 325$  мм; в — Фурье-голограмма в области Фраунгофера, расстояние от образца до плоскости изображения  $l = 95$  см; г — то же при  $l = 260$  см; д — передача голограммического изображения с помощью ЗП на расстояние  $l = 115$  см; е — то же при  $l = 160$  см; з —  $l = 190$  см

178,2 мкм, фокусное расстояние — 57,5 см, высота рельефа — 10,5 мкм, толщина мембранны — 16 мкм. Коэффициент пропускания мембранны для энергии 10 кэВ составляет 79 %. Средний коэффициент пропускания поверхности рельефа — 93 %. Изображения снимались при фиксированном положении тестового объекта, а именно, на расстоянии 90 см перед ЗП.

Таким образом, была экспериментально осуществлена передача изображения слабого фазово-

го тестового объекта в первом дифракционном порядке ЗП. Изображения регистрировались более 10 раз, при шаге по расстоянию от объекта до ССД-камеры 100 мм. На рис. 2, в—з показаны изображения, полученные на разных расстояниях от ЗП.

Также исследована передача изображения в случаях, когда: 1) тестовый объект находился между ЗП и минус первым порядком ЗП (мнимое изображение); 2) тестовый объект находился в  $\pm 3$  мм от минус первого порядка

ЗП (изображение тестового объекта уходит в бесконечность). В обоих случаях изображение тестового объекта в пространстве после ЗП отсутствовало. Полученные результаты подтверждают применимость законов геометрической оптики в жестком рентгеновском диапазоне, в частности, формулы линзы для ЗП.

### Обсуждение экспериментальных результатов

Полученный контраст не может быть амплитудным, так как коэффициент поглощения тестового объекта из кремния сравнительно маленький. Более того, амплитудный контраст должен наблюдаться на ближнем поле. Полученный контраст не может быть только фазовым, потому что диффузор очень слабо влияет на изображение. Также для передачи изображения с помощью ЗП нужно ставить в фокусе первого порядка фазовую пластинку, которая дает сдвиг по фазе  $\pi/2$  [3, 4, 11]. Но при передаче изображения в схеме рис. 2, в не использовалась фазовая пластина. Следовательно, полученный контраст не может быть только фазовым, несмотря на то, что буквы тестового объекта с высотой 3 мкм для энергии 12,4 кэВ сдвигают фазу на  $0,24\pi$ .

Причиной формирования изображения является дифракция на буквах с сильными краевыми эффектами (*edge enhanced contrast*) на границах букв, где происходит скачок фазы. После дифракции пучок приобретает некую расходимость  $\alpha = \lambda/a$ , где  $\lambda$  — длина волны падающего излучения,  $a$  — ширина буквы, далее интерферирует опорным пучком, который без отклонения распространяется мимо букв и формирует голограммическое изображение (голограмма Габора), см. рис. 2, а, б. Полученное изображение (см. рис. 2, д—з) при фиксированных координатах тестового объекта является прямым доказательством, что сформированное изо-

бражение голографическое. Так как трехмерное изображение формируется непрерывно после объекта до ЗП, именно поэтому при передаче изображения получается одинаковая резкость с разными увеличениями.

## Заключение

В работе впервые зарегистрирована Габоровская голограмма от кристаллических букв для жесткого рентгеновского излучения на расстоянии 1 км от источника. Экспериментально осуществлена передача голографического изображения в жестком рентгеновском излучении. Результаты работы открывают возможности для создания новых диагностических приборов для рентгеновского излучения. С развитием нанотехнологии можно создать ЗП с

разрешением несколько нанометров и передавать голографическое изображение объектов с увеличением  $10-10^4$  раза, что имеет конкретное применение, как в области нанотехнологии, так и биологии.

*Работа поддержанна Российским фондом фундаментальных исследований (гранты РФФИ № 02-02-22009, № 03-02-17267, № 04-02-17365).*

## Список литературы

1. Baruchel J., Cloetens P., Hartwig J., Ludwig W., Mancini L., Pernot P., Schlenker M. // J. Synchrotron Radiation. 2000. V. 7. P. 196–201.
2. Schroer C. G., Benner B., Guenzler T. F., Kuhlmann M., Lengeler B., Rau C., Weitkamp T., Snigirev A., Snigireva I. // Acta Cryst. 2002. V. A58, P. C51.
3. Kagoshima Y., Yokoyama Y., Ibuki T., Niimi T., Tsusaka Y., Takai K., Matsui J. // J. Synchrotron Radiation. 2002. V. 9. P. 132–135.
4. Kagoshima Y., Ibuki T., Yokoyama Y., Tsusaka Y., Matsui J., Takai K., Aino M. // Jpn. J. Appl. Phys. 2001. V. 40. Part 2. P. L1190–L1192.
5. Leitenberger W., Weitkamp T., Drakopoulos M., Snigireva I., Snigirev A. // Optics Communications. 2000. V. 180. P. 233–238.
6. Davis T., Gan D., Gureyev T., Stevenson A., Wilkins S. // Nature. 1995. V. 373. P. 595–598.
7. Kuyumchyan A., Isoyan A., Shulakov E., Aristov V., Kondratenkov M., Snigirev A., Snigireva I., Souvorov A., Tamasaku K., Yabashi M., Ishikawa T., Trouni K. // Proceedings of SPIE. 2002. V. 4783. P. 92–96.
8. Ishikawa T., Tamasaku K., Yabashi M., Goto S., Tanaka Y., Yamazaki H., Takeshita K., Kimura H., Ohashi H., Matsushita T., Ohata T. // Proceedings of SPIE. 2001. V. 4145. P. 1–10.
9. Matsumura T., Kinoshita K., Tamura S., Kamijo N., Ozaki Y., Kihara H. X-Ray Microscopy and Spectromicroscopy / Edited by J. Thieme, G. Schmahl, D. Rudolph, & E. Umbach. Berline: Springer-Verlag, 1998, P. II-195-II-199.
10. Born M., Wolf E. W. Principles of Optics. 7-th edition. London: Cambridge University Press. 1999.
11. Rudolph D., Schmahl G., Miemann H. Modern Microscopies, Techniques and Applications / Edited by A. Michette&P. Duke. London: Plenum Press, 1990. P. 59–67.

УДК 621.38.049.772.1

**Ю. В. Панфилов**, д-р техн. наук,  
МГТУ им Н. Э. Баумана,  
**М. И. Самойлович**, д-р физ.-мат. наук,  
ОАО ЦНИТИ "Техномаш",  
**О. С. Зилова**, канд. техн. наук,  
ФГУП НИИВТ им. С. А. Векшинского

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ОПАЛОВОЙ МАТРИЦЫ С ТОНКОПЛЕНОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

*Проанализированы методы нанесения тонких пленок в вакууме на подложки из синтетического опала и выбраны термическое испарение, ионно-плазменное распыление и ионное осаждение. Разработана многопозиционная вакуумная установка, оснащенная автономным источником ионов, магнетронной распылительной системой и дуговым испарителем. Исследовано влияние метода нанесения тонких пленок на топографию поверхности опаловой матрицы, ее электрическое сопротивление и характер отражения луча лазера.*

## Введение

Одним из наиболее перспективных материалов для получения фотонных кристаллов является синтетический опал, представляющий собой плот-

ноупакованные наносферы диоксида кремния с диаметром от 200 до 600 нм, образующие трехмерную решетку — опаловую матрицу [1].

Интерес к опаловым матрицам с тонкопленочными покрытиями вызван практически неограниченной номенклатурой материалов тонких пленок, диапазоном толщин отдельных слоев и многослойных структур от единиц нанометров до единиц микрометров, а также другими достоинствами технологий тонких пленок.

В настоящее время отсутствуют публикации об исследованиях различных методов нанесения тонких пленок в вакууме на подложки с рельефом поверхности синтетического опала. Особенностью процесса формирования тонких пленок на строго упорядоченных полусферах поверхности опаловой матрицы является переменный угол осаждения пленкообразующих частиц. В результате этого оказывается, по сравнению с "гладкими" образцами, характер появления зародышей, образования монослоя осаждаемого материала и дальнейшего формирования тонкопленочного покрытия.

Целью данного направления исследований является экспериментальное определение влияния метода нанесения тонких пленок в вакууме на геометрические, электрические, оптические и другие свойства поверхности опаловых матриц с тонкопленочными покрытиями.

В представленной работе рассмотрены методы термического испарения, ионно-плазменного магнетронного распыления и осаждения тонких пленок из ионного пучка [2]. В качестве исследуемых характеристик выбраны рельеф тонкопленочного покрытия, электрическое сопротивление и вид отражения луча лазера. Эти характеристики определялись на подложках из синтетического опала и на "гладких" ситалловых пластинах, на которые тонкопленочное покрытие наносилось одновременно.

### 1. Методы нанесения тонких пленок в вакууме на опаловую матрицу

Как известно, методы нанесения тонких пленок в вакууме различаются способом генерации частиц материала (атомы, молекулы, ионы, кластеры), их энергией и плотностью потока [2]. Наиболее распространенными являются термические и ионно-плазменные методы.

В качестве осаждаемых методом термического испарения материалов были выбраны Sn, Pb, Ni и Bi, небольшие кусочки которых помещались в тигель из нитрида бора (рис. 1, а) и нагревались вольфрамовой спиралью до температуры испарения. Тонкая пленка наносилась на ситалловую подложку с закрепленным на ней образцом опала на установке с колпаком из кварцевого стекла (рис. 1, б).

Метод термического испарения очень прост в реализации, но имеет ограничения по номенклатуре наносимых материалов и обладает самой низкой энергией (доли электрон-вольт) пленкообразующих частиц, равной  $kT_i$ , где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_i$  — температура испарения материала.

Более универсальными (практически любые материалы тонких пленок, энергия частиц от единиц до сотен электрон-вольт, подложки большого размера и т. д.) являются ионно-плазменные ме-

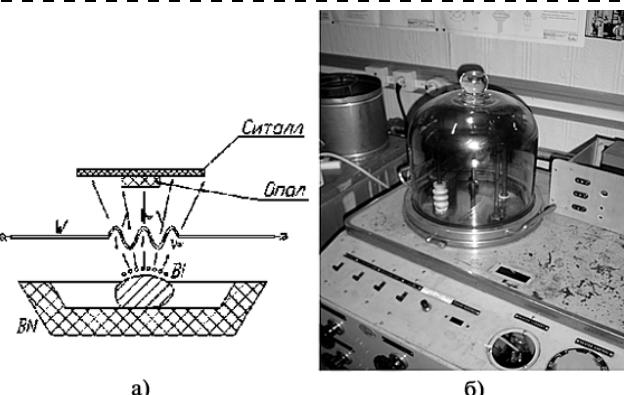


Рис. 1. Установка для осаждения тонкой пленки Bi и других материалов методом термического испарения:  
а — схема; б — внешний вид

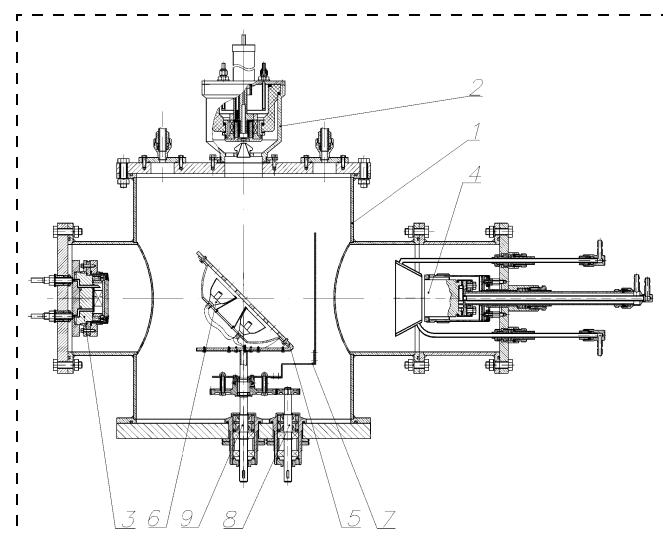


Рис. 2. Схема трехпозиционной установки для нанесения тонких пленок в вакууме:

1 — вакуумная камера; 2 — ионно-лучевой источник; 3 — магнетрон; 4 — дуговой источник; 5 — наклоняемый подложкодержатель; 6 — нагреватель подложек; 7 — заслонка; 8 — привод поворота заслонки; 9 — привод вращения подложкодержателя

ды осаждения тонких пленок в вакууме, часть из которых реализована на трехпозиционной установке (рис. 2), оснащенной магнетронной распылительной системой (МРС), дуговым источником (ДИ) и автономным источником ионов (АИИ). Образцы могут закрепляться на наклоняемом столике, размещенном на вводе вращения.

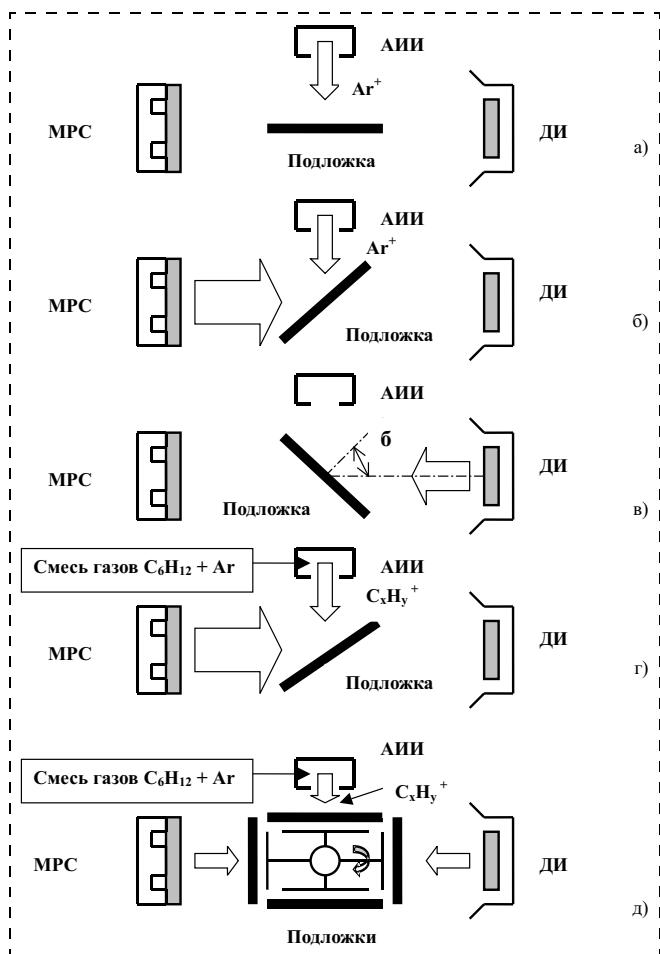
Наличие трех источников и наклоняемого столика позволяет осуществлять несколько вариантов нанесения тонкопленочных покрытий (рис. 3):

- проводить активацию поверхности подложки перед нанесением пленки с помощью АИИ (рис. 3, а);
- наносить пленку с помощью МРС или ДИ с ионно-лучевым ассирированием (рис. 3, б);
- наносить пленку под углом к поверхности подложки (рис. 3, в);
- наносить многокомпонентную пленку при одновременной работе двух или трех источников (рис. 3, г), причем одним из компонентов может быть, например, алмазоподобный углерод, осаждаемый с помощью АИИ из ионного пучка;
- наносить многослойные тонкопленочные покрытия при последовательной работе двух или трех источников (рис. 3, д).

В данной работе ионно-плазменными методами наносились пленки Ti (МРС) и пленки алмазоподобного углерода  $\alpha$ -C:H (АИИ), а также комбинации этих материалов.

### 2. Исследуемые характеристики

Из большого многообразия характеристик фотонных кристаллов были выбраны электрическое



**Рис. 3. Варианты работы трехпозиционной установки:**  
а — активация подложки перед нанесением тонкой пленки; б — нанесение тонкой пленки с ионным ассистированием; в — нанесение пленки под углом к поверхности подложки; г — нанесение многокомпонентной пленки; д — нанесение многослойной пленки

сопротивление сформированных на синтетическом опале тонкопленочных покрытий, геометрия поверхности и отражение луча лазера.

Электрическое сопротивление измерялось между двух контактных полосок с одинаковыми длиной и расстоянием между полосками с помощью мультиметра марки M890G. Сравнивались показания мультиметра для ситалловой и опаловой подложек, на которые пленки наносились одновременно. В результате для всех без исключения случаев сопротивление пленки на опаловой подложке оказалось существенно больше, чем на ситалле. Так, для пленки Ви, толщиной 40 нм, сопротивление составило 12 МОм/□ на ситалле и более 200 МОм/□ на опале.

Объяснение этому факту было дано после получения изображения поверхности с помощью зондовых микроскопов. Увеличение электрического сопротивления тонкой пленки на "рельефной" по-

верхности опала связано, по нашему мнению, с двумя факторами: разнотолщинностью проводящего слоя (во впадинах пленка в десятки раз тоньше, чем на вершинах полусфер) и уменьшением фактической площади контакта между контактной полоской и пленкой на поверхности опала (рис. 4).

Пленка Ти толщиной 550 нм имела сопротивление 25 Ом/□ на ситалле и 150 Ом/□ на опале. Пятислойная пленка Ti/α-C:H/Ti/α-C:H/Ti, нанесенная последовательно двумя источниками MPC и АИИ под углом 45°, имела сопротивление 5 кОм/□ на ситалле и 150 кОм/□ на опале.

Тонкая пленка, нанесенная на "гладкий" ситалл, независимо от материала и метода нанесения, имела шероховатость порядка  $R_a = 2,1 \dots 2,3$  нм. Рельеф исходной опаловой подложки без пленки, полученный на сканирующем зондовом микроскопе "ФемтоСкан" (МГУ им. М. В. Ломоносова), показан на рис. 5 (см. третью сторону обложки).

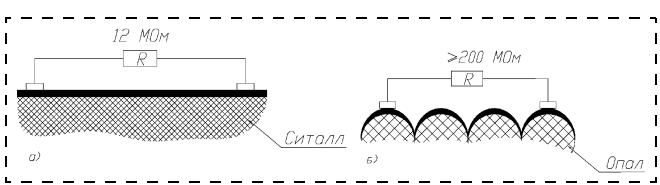
Исследования поверхности опаловой подложки с пленкой Ви, нанесенной методом термического испарения, показали (рис. 6, см. третью сторону обложки), что преобладающим оказался рост пленки на вершинах полусфер опаловой матрицы, это дало увеличение шероховатости с  $R_q = 12,02$  нм для исходного опала до  $R_q = 60,98$  нм для опала с пленкой Ви.

При магнетронном методе осаждения шероховатость поверхности опала с пленкой Ти также увеличилась ( $R_q = 99,75$  нм) по сравнению с исходным опалом, но уже без явного преобладания роста пленки на вершинах полусфер опаловой матрицы (рис. 7, см. третью сторону обложки).

Шероховатость же пятислойной пленки Ti/α-C:H/Ti/α-C:H/Ti значительно уменьшилась (рис. 8) и составила  $R_q = 26,05$  нм.

Ниже в таблице приведены характеристики топографии поверхности исследованных образцов опаловой матрицы, из которых следует, что по сравнению с исходным опалом у образцов с тонкопленочными покрытиями существенно увеличились шероховатость ( $R_q$ ), фрактальная размерность ( $D_F$ ) и площадь поверхности ( $S$ ).

Представленные в таблице данные получены в результате обработки изображения поверхности исследованных образцов, полная картина которой



**Рис. 4. Схема измерения электрического сопротивления тонкой пленки Ви:**  
а — на "гладком" ситалле; б — на подложке из синтетического опала

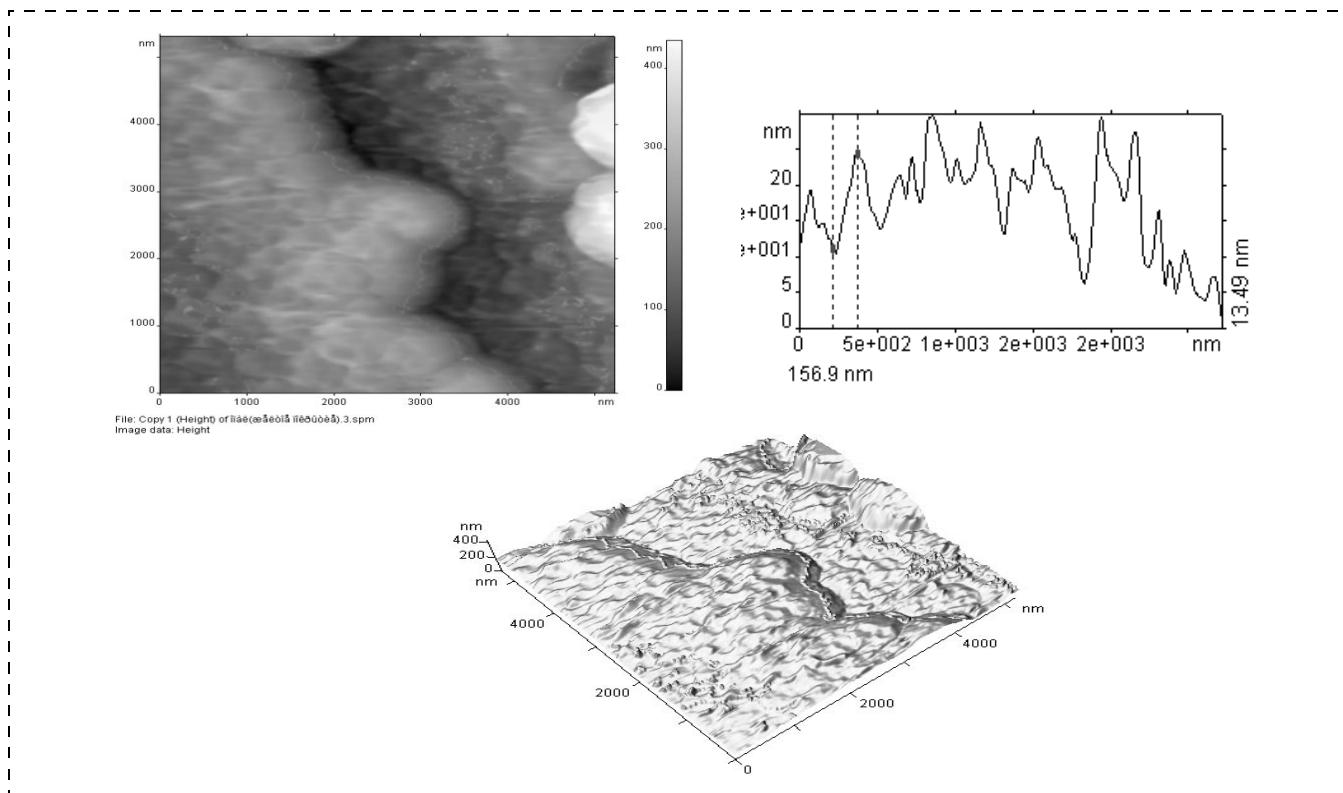


Рис. 8. Изображение поверхности образца опала с пленкой Ti/α-C:H/Ti/α-C:H/Ti

#### Характеристики топографии поверхности образцов фотонных кристаллов

№	Описание образца	Размер скана, нм	$R_q$ , нм	Характерный периметр особенности, нм	Фрактальная размерность $D_F$	$S$ , нм <sup>2</sup>	$\Delta S$ , нм <sup>2</sup>
1	Исходный опал	2172 × 2108 × 110	12,02	1641	$2,00177 \pm 0,00006$	$4,9 \cdot 10^6$	$1,05 \cdot 10^5$
2	Опал с пленкой Ві	2940 × 2940 × 340	60,98	1178±3171	$2,0097 \pm 0,0003$	$9,546 \cdot 10^6$	$9,03 \cdot 10^5$
3	Опал с пленкой Ti	5264 × 5359 × 585	99,75	8360	$2,0143 \pm 0,0010$	$3,286 \cdot 10^7$	$4,66 \cdot 10^6$
4	Опал с пленкой Ti/α-C:H/Ti/α-C:H/Ti	2641 × 2945 × 205	26,05	792	$2,0194 \pm 0,0016$	$9,649 \cdot 10^6$	$1,87 \cdot 10^6$

приведена на рис. 9 на примере поверхности опаловой матрицы без тонкопленочных покрытий.

Оптические свойства фотонных кристаллов — особая область исследований. В данной работе ставилась задача качественно сравнить характер отражения луча лазера ЛГ-78 с длиной волны 0,69 мкм от исследуемых образцов. Исследования проводились на стенде, схема которого показана на рис. 10.

При облучении образцов под углом  $\alpha = 45^\circ$  были получены следующие результаты (рис. 11, а—ж, см. четвертую сторону обложки):

1) зеркальное отражение от ситалловой подложки с пленкой Ni (рис. 11, а), нанесенной методом термического испарения, а также от ситалловой подложки с пленками из других материалов, оса-

женных как термическим испарением, так и ионно-плазменными методами (рис. 11, б);

2) диффузное рассеяние от подложки из исходного опала без пленки (рис. 11, б) и от опаловой подложки с пленкой Ti, нанесенной магнетронным методом (рис. 11, г);

3) отражение в виде области небольшого диаметра (аналог точечной дифракции для кристаллических материалов) от опаловой матрицы с пятислойной пленкой Ti/α-C:H/Ti/α-C:H/Ti (рис. 11, д) и в виде световой дорожки от опаловой матрицы с пленкой Ti, нанесенной магнетронным методом (рис. 11, е).

При изменении угла облучения исходной опаловой матрицы до  $\alpha = 20^\circ$  (см. рис. 10) диффузное

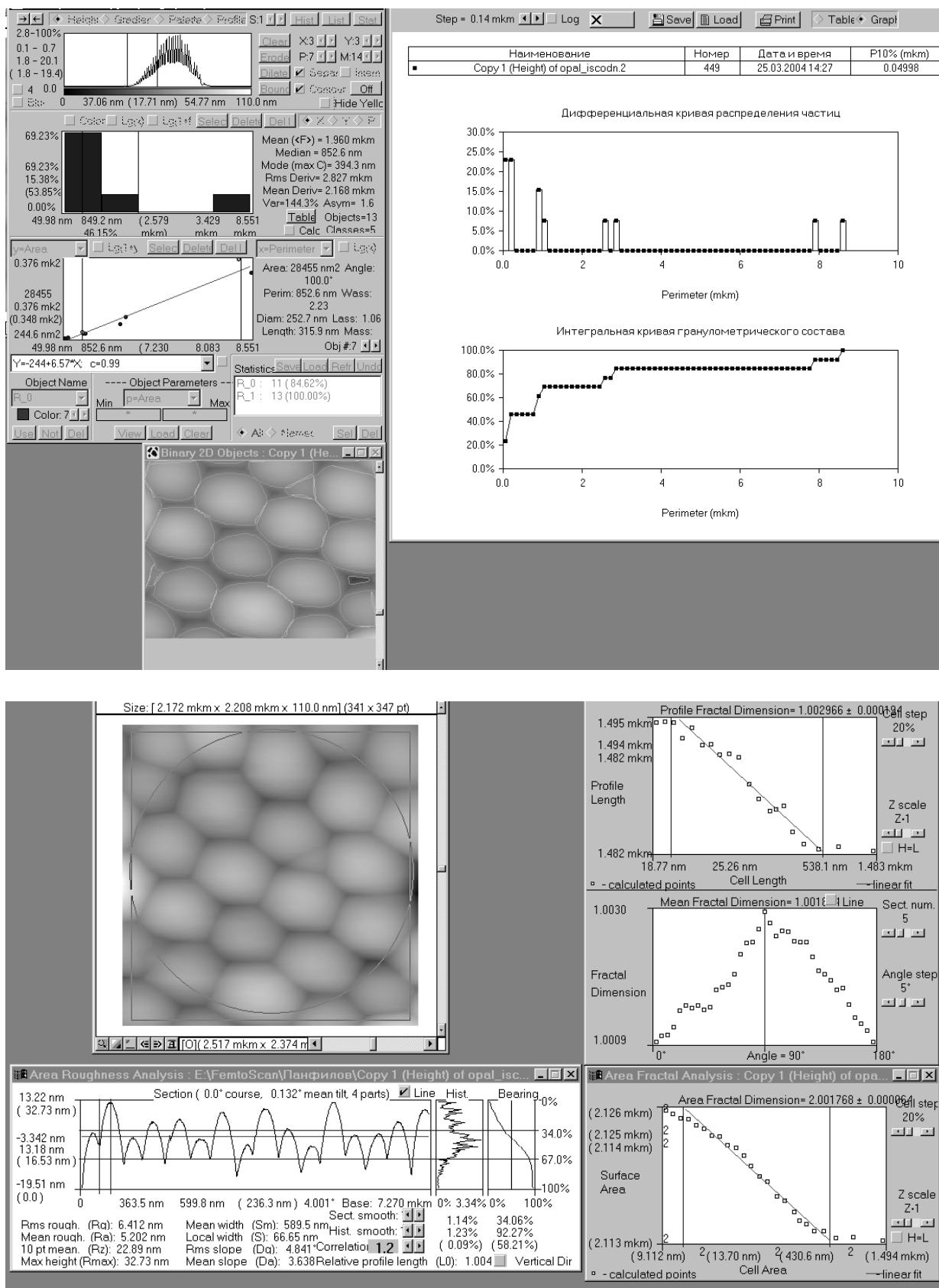


Рис. 9. Пример обработки изображения поверхности опаловой матрицы

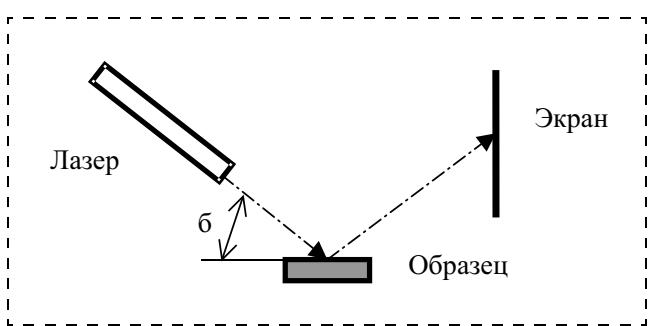


Рис. 10. Схема изучения вида отражения луча лазера

рассеяние (см. рис. 11, б) трансформируется в световую дорожку (рис. 11, ж).

### 3. Обсуждение результатов

Результаты проведенных исследований электрического сопротивления, рельефа поверхности и характера отражения лазерного луча позволяют сделать следующие заключения:

- метод и режимы осаждения тонкопленочных покрытий являются действенным инструментом управления геометрическими, электрическими и оптическими характеристиками поверхности фотонных кристаллов на основе опаловой матрицы;
- между шероховатостью поверхности опаловой подложки с тонкопленочным покрытием и характером отражения лазерного луча имеется корреляция — чем меньше  $Rq$ , тем более контрастное отражение;
- электрическое сопротивление тонких пленок на опаловой подложке определяется и шероховатостью поверхности и, естественно, материалом пленки (его удельным сопротивлением) — многослойное покрытие Ti/ $\alpha$ -C:H/Ti/ $\alpha$ -C:H/Ti имеет большее сопротивление, чем титановая пленка при той же толщине, и значительно меньшей шероховатости поверхности.

Исследования в данном направлении будут продолжены для таких методов нанесения тонких пленок в вакууме, как термо-ионное осаждение, стимулированное плазмой газофазное осаждение и импульсное дуговое осаждение [2].

### Список литературы

1. Нанотехнологии и фотонные кристаллы: Материалы I Международного семинара / Под ред. д. т. н. А. Ф. Белянина и д. ф.-м. н. М. И. Самойловича. — Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. 180 с.

2. Машиностроение. Энциклопедия: Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III—8 / Под общ. ред. Ю. В. Панфилова. М.: Машиностроение, 2000. 744 с.

УКД 621.793.164

**М. С. Бибишкин, И. Г. Забродин, С. Ю. Зуев,  
Е. Б. Клюенков, канд. физ.-мат. наук,  
А. Е. Пестов, Н. Н. Салащенко, чл.-корр. РАН,  
Д. П. Чехонадских, Н. И. Чхало, канд. физ.-мат.  
наук,  
Институт физики микроструктур РАН,  
г. Нижний Новгород**

## ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО И МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Подробно описываются два рефлектометра, предназначенные для исследования отражательных характеристик элементов ЭУФ и МР оптики в диапазоне длин волн 0,6...20 нм. Один из них позволяет исследовать зеркала практически с любой формой отражающей поверхности с размером до 300 мм. Второй предназначен для изучения влияния мощных источников ЭУФ излучения на коэффициенты отражения МЗ и обеспечивает разрешение изменений коэффициентов отражения на уровне 0,1 %.

### Введение

Прогресс микроэлектронных технологий будущего во многом связан с успехами в развитии литографии экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения на длине волны 13,5 нм, которая должна обеспечить серийный выпуск интегральных схем с размерами элементов до 30 нм, а в перспективе — до 10 нм [1]. Для создания коммерческой литографической установки (сканера) необходимо решить ряд серьезных физико-технических и технологических проблем.

Одной из проблем является разработка технологии производства супергладких (шероховатость поверхности на уровне 0,1 нм) и суперточных (отклонение формы поверхности, в общем случае асферической, от расчетного значения менее 1 нм) подложек для зеркал. Диаметр подложек может достигать 500 мм. Другой проблемой является нанесение на эти подложки многослойных (число слоев до 100) Mo/Si отражающих покрытий с переменными по поверхности толщинами слоев Mo и Si (*graded structures*). При этом отклонение толщин пленок от расчетных значений не должно превышать 0,01 нм. Кроме того, данные покрытия не должны иметь стресса, который приводит кискажению формы поверхности. Последней, не менее важной, проблемой является создание недорогого высокоеффективного источника ЭУФ излуче-

ния, мощностью до 100 Вт, поток от которого излучается в телесный угол 1 стерadian спектральной полосы 2 % в окрестности длины волн 13,5 нм [2]. При этом наряду с энергетическими характеристиками источник должен быть оптимизирован с точки зрения минимизации вызываемых им загрязнений поверхностей зеркал.

Для успешного решения перечисленных проблем необходимо создание соответствующего лабораторного измерительного оборудования для изучения отражательных характеристик зеркал. До настоящего времени подобные измерения проводили с помощью синхротронного излучения [3], основными достоинствами которого являются высокая интенсивность и стабильность ЭУФ излучения и хорошо развитая рефлектометрическая инфраструктура. Однако использование синхротронов имеет и ряд существенных недостатков, главными из которых являются высокая стоимость таких измерений и отсутствие оперативной информации. Например, при напылении многослойной структуры технологу необходима оперативная информация о распределении периода после каждой коррекции технологического процесса, т. е. в течение нескольких часов, максимум день. С учетом масштаба проводимых работ (сотни и тысячи образцов) остро встала проблема создания лабораторных прецизионных рефлектометров.

Данная статья посвящена двум аспектам проблемы ЭУФ литографии. А именно, рефлектометру для исследования отражательных характеристик многослойных зеркал (МЗ) для оптической схемы сканера и масок и рефлектометру для изучения влияния мощных источников ЭУФ излучения на коэффициенты отражения МЗ. Один из них позволяет исследовать угловые и спектральные характеристики МЗ с любой формой отражающей поверхности в диапазоне длин волн 0,6...20 нм. Второй рефлектометр, специально изготовленный для изучения влияния источников излучения на зеркала, позволяет изучать плоские образцы. Благодаря све-

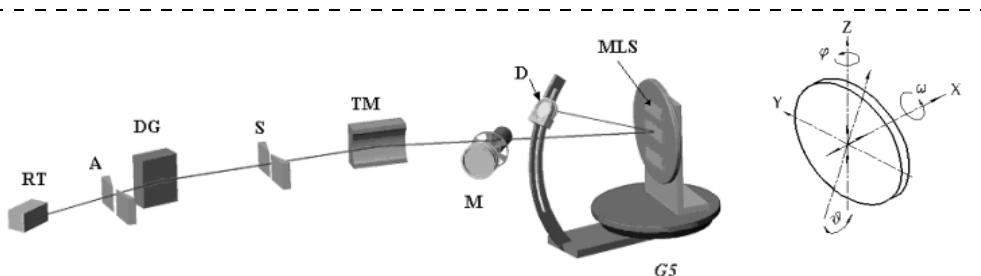
тосильной оптической схеме и уникальной рентгеновской трубке последний прибор разрешает изменения коэффициентов отражения на уровне 0,1 %.

### 1. Рефлектометр для исследования МЗ в диапазоне длин волн 0,6...20 нм

Рентгенооптическая схема рефлектометра приведена на рис. 1. Работа прибора происходит следующим образом. Излучение рентгеновской трубки *RT* проходит через диафрагму *A* и падает на сферическую дифракционную решетку *DG*. Дифрагированное излучение, чаще всего эмиссионные линии *K*, *L* и *M* материала мишени рентгеновской трубки, в соответствии с уравнением дифракционной решетки

$$\cos\alpha - \cos\beta = m\lambda/D, \quad (1)$$

где *m* — порядок дифракции;  $\lambda$  — длина волны; *D* — период решетки;  $\alpha$  и  $\beta$  — углы падения и дифракции, соответственно, проходит через выходную щель спектрометра *S*. Вышедшее из монохроматора излучение падает на торoidalное зеркало *TM*. Горизонтальный  $R_h$  и вертикальный  $R_v$  радиусы тора выбраны таким образом, чтобы в горизонтальной плоскости зеркало строило изображение выходной щели *S*, а в вертикальной плоскости — источника *RT* на исследуемом образце *MLS*. Следует отметить, что при сканировании по спектру, расстояния между выходной щелью прибора и зеркалом, а также между зеркалом и исследуемым образцом остаются неизменными, в то время как расстояние источник излучения — торoidalное зеркало изменяется. Соответственно, размер пятна в горизонтальной плоскости остается фиксированным, а в вертикальной плоскости — переменным. Радиусы тора и углы падения излучения на тор были выбраны такими, чтобы в середине спектрального диапазона монохроматора размер зондирующего пучка на исследуемом образце был 0,7 мм шириной и 1 мм высотой. Отраженный от тора пучок проходит через врачающийся экран с отвер-



**Рис. 1. Рентгенооптическая схема универсального рефлектометра и схема движений, обеспечиваемых гoniометром *G5*:**

*RT* — рентгеновская трубка; *A* — коллимирующая диафрагма; *DG* — сферическая дифракционная решетка; *S* — выходная щель; *TM* — торoidalное зеркало; *M* — монитор, *D* — основной детектор; *MLS* — тестируемый образец; *G5* — пятиосный гониометр

стиями (прозрачность 60 %) и попадает на исследуемый образец. Оставшаяся часть пучка падает на лопасти экрана, покрытого светочувствительным слоем (CsI), и регистрируется детектором монитора  $M$ . Отраженное от исследуемого зеркала излучение регистрируется основным детектором  $D$ . Образец и детектор устанавливаются на гoniометре  $G5$ .

Коэффициент отражения исследуемого образца  $R$  определяется из соотношений:

$$R = I_R / (KI_m); \quad (2)$$

$$K = I_{D0} / I_m, \quad (3)$$

где  $I_R$  — интенсивность пучка, отраженного от исследуемого образца;  $I_m$  — интенсивность, регистрируемая монитором, и  $I_{D0}$  — интенсивность, регистрируемая детектором  $D$  при выведенном из пучка образце;  $K$  — калибровочный множитель, определяемый перед каждым измерением.

Изменение длины волны осуществляется за счет линейного перемещения и одновременного поворота дифракционной решетки и источника излучения. При этом угол падения излучения на решетку  $\alpha$  остается неизменным, а угол дифракции изменяется согласно закону:

$$\beta = \arcsin(X/R_G), \quad (4)$$

где  $X$  — расстояние между центром дифракционной решетки  $DG$  и щелью  $S$ ;  $R_G$  — радиус решетки.

Основным отличием данного рефлектометра от аналогичных приборов, у которых в качестве спектрометра-монохроматора используется спектрометр скользящего падения PCM-500 [4, 5], является отсутствие входной щели. Установка рентгеновского источника непосредственно на круг Роулонда решило две важные проблемы. Во-первых, число рентгенооптических элементов было уменьшено на 2 (собирающее зеркало и щель). Это упростило юстировку прибора и увеличило его светосилу. Во-вторых, механический момент, действующий на ось дифракционной решетки, уменьшился в 2 раза, что обеспечило большую стабильность юстировки и повысило точность спектральных измерений.

Для исследования локальных отражательных характеристик МЗ, нанесенных как на плоские, так и на кривые поверхности, был разработан пятиосный гoniометр. Гoniометр работает следующим образом (см. рис. 1). Рентгеновский пучок падает в точку пересечения осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . С помощью линейных перемещений вдоль  $X$  и  $Z$ , а также вращения  $\omega$  вокруг оси  $X$ , любая точка поверхности образца может быть выведена на зондирующий пучок. Детектор может вращаться вокруг осей  $Z$  (2φ-сканирование) и  $Y$  (29-сканирование). Пределы и точности всех движений приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Типы движений, обеспечиваемых гoniометром,  
и их основные характеристики

Тип движения	Пределы движения	Точность
$X$ — координата, мм	50	0,02
$Z$ — координата, мм	150	0,02
$\omega$ — вращение, градусы	360	0,1
$\varphi$ — вращение, градусы	360	0,02
$\psi$ — вращение, градусы	$\pm 30$	0,02
$2\varphi$ — вращение, градусы	360	0,02
$2\omega$ — вращение, градусы	$\pm 30$	0,02

На рис. 2 приведена типичная спектральная зависимость коэффициента отражения Mo/Si МЗ, снятая на данном рефлектометре. Структура была напылена методом магнетронного распыления и имела период  $d = 6,73$  нм и число периодов  $N = 50$ . Угол падения излучения на зеркало, отсчитываемый от нормали к поверхности, составлял 5°. Как видно из этой зависимости, пиковый коэффициент отражения достигает 69 %, что соответствует самым высоким мировым достижениям [6].

## 2. Сканирующий рефлектометр для исследования деградации зеркал в окрестности $\lambda = 13,5$ нм

Как уже отмечалось выше, одной из серьезных проблем, стоящих на пути коммерческой ЭУФ литографической установки, является загрязнение и соответственно деградация коэффициентов отражения зеркал, вызванных различными процессами в мощном источнике ЭУФ излучения. Остроту проблемы можно проиллюстрировать следующими примерами. Пленка углерода толщиной 10 нм на поверхности зеркала приводит к падению коэффициента отражения на длине волны 13,5 нм более чем на 12 %, а пленка Fe, толщиной 1 нм — около

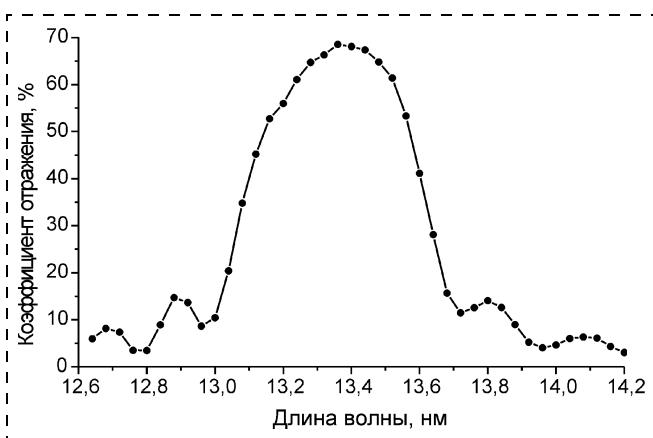


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от длины волны Mo/Si зеркала в окрестности  $\lambda \approx 13$  нм, снятая на рефлектометре

10 %. Учитывая важность этой проблемы для долговременной работы литографической установки, во многих лабораториях ведутся активные исследования по изучению пространственного распределения эрозионных потоков в окрестности зеркал с целью оптимизации источников ЭУФ излучения и средств подавления этих потоков. Так как за реальное время эксперимента (часы/дни) загрязнения оптических элементов должны быть малы, то для их обнаружения и получения количественной информации в целях экстраполяции этих данных на продолжительное время работы установки рефлектометр должен регистрировать изменения коэффициентов отражения на уровне менее 1 %.

Для этих целей в ИФМ РАН был разработан недорогой, малогабаритный лабораторный рефлектометр, оптическая схема которого приведена на рис. 3. Работа прибора происходит следующим образом. Изображение ЭУФ источника (*X-Ray tube*) с помощью плоского (*Plane mirror*) и сферического (*Spherical mirror*) МЗ передается на исследуемый образец (*Sample*). Увеличение оптической системы равно 2. Отраженное от образца излучение регистрируется детектором (*MCP detector*). Фильтры перед сферическим зеркалом и детектором предназначены для поглощения длинноволнового излучения и заряженных частиц, выходящих из рентгеновской трубки. Исследуемый образец устанавливается на вращающемся столе (*Rotating sample holder*), на котором может быть установлено до 10 образцов с размерами от 18 до 30 мм. При вращении стола локальные коэффициенты отражения измеряются вдоль дуги окружности диаметром 110 мм. Шаг сканирования составляет 0,345 мм. Абсолютное значение коэффициента отражения  $R_m$  может быть получено из соотношения:

$$R_m = R_r I_m / I_r, \quad (5)$$

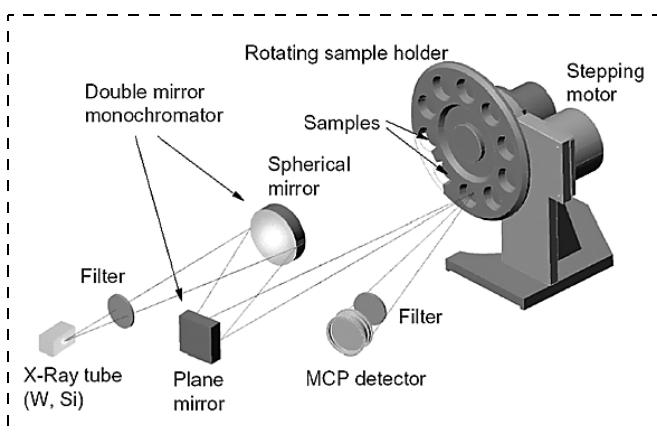


Рис. 3. Оптическая схема двухзеркального рефлектометра

где  $R_r$  — коэффициент отражения ранее аттестованного зеркала (эталона);  $I_m$  и  $I_r$  — интенсивности излучения, отраженные от исследуемого и эталонного образцов соответственно. В качестве эталонного зеркала может также служить часть исследуемого зеркала, закрытая экраном от эрозионных потоков источника ЭУФ излучения.

В качестве источника ЭУФ излучения была использована разборная рентгеновская трубка с вольфрамовой и кремниевой (W и Si) мишнями. В первом случае использовалось тормозное излучение, во втором — эмиссионная линия Si  $L_\alpha$ . Спектры излучений обоих материалов в ЭУФ диапазоне приведены на рис. 4. Как показали исследования, на длине волны 13,5 нм при той же самой электрической мощности, прикладываемой к рентгеновской трубке, интенсивность Si  $L_\alpha$  линии в 45 раз выше, чем интенсивность излучения из вольфрамовой мишени. Однако стабильность интенсивности эмиссии из W, изменение интенсивности менее 1 % за час оказалось существенно лучше, чем мишени из Si (8 % за час). Таким образом, все последующие эксперименты проводились с вольфрамовой мишенью.

Применение двух МЗ, работающих при углах, близких к  $90^\circ$ , в качестве монохроматора излучения обеспечило одновременно высокую светосилу прибора (0,034 стерадиана) и спектральное разрешение  $\lambda/\Delta\lambda \approx 100$ . Следует отметить, что традиционная для данной спектральной области многослойная структура Mo/Si не позволяет одновременно получить высокие коэффициенты отражения и селективность порядка 100. Поэтому в результате численных и технологических экспериментов была найдена пара материалов Nb/Si, оптимально удовлетворяющая двум этим условиям. Спектральные зависимости коэффициентов отражения таких зеркал, измеренные на рефлектометре [5], приведены на рис. 5.

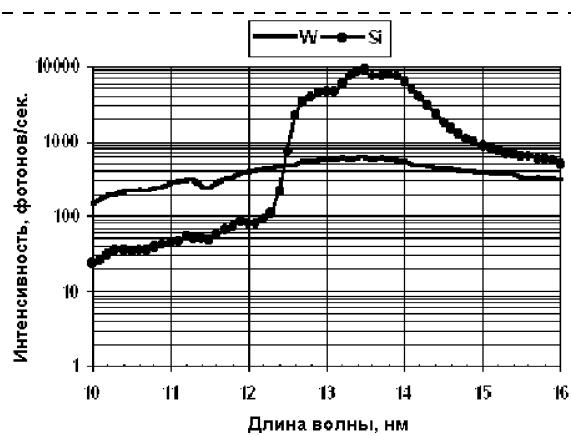


Рис. 4. Эмиссионные спектры W и Si мишеней в ЭУФ-диапазоне, в окрестности  $\lambda \approx 13$  нм. Параметры рентгеновской трубки:  $U_W = U_{Si} = 6$  кВ,  $I_W = 30$  мА,  $I_{Si} = 10$  мА

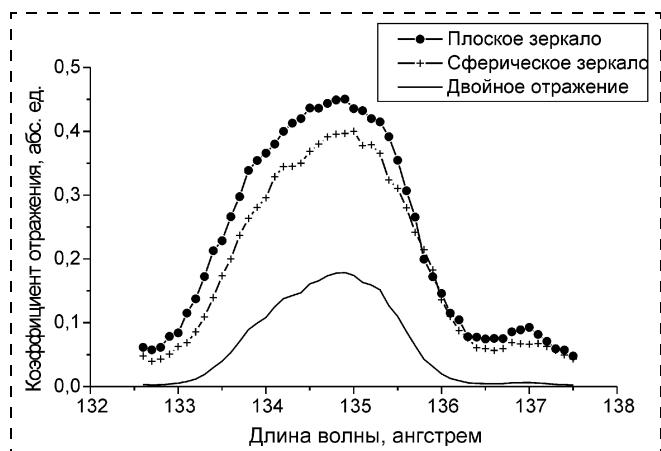


Рис. 5. Спектральные зависимости коэффициентов отражения Nb/Si МЗ. Углы падения излучения на зеркала: 6° — для сферического и 7° — для плоского. Сплошная линия соответствует двукратному отражению

Необходимо также отметить, что локальные углы падения излучения на зеркала являются функцией координаты точки падения. Поэтому для выполнения условия конструктивной интерференции период напыляемых структур также изменяют по поверхности зеркал. Отклонение периода от расчетного значения не превышало 0,4 %.

В качестве отрезающих фильтров используют тонкие многослойные пленки Mo/Si, приkleенные на никелевые сетки. Пропускание фильтров на длине волны 13,5 нм составило 46 %. Подробнее о свойствах фильтров и методе их изготовления можно найти в работе [7].

При выборе детектора для рефлектометра учитывалось два фактора. Во-первых, размер пучка, который в зоне детектора составляет около 18 мм. Во-вторых, детектор должен обеспечивать линейную регистрацию (уровень нелинейности менее 1 %) падающего потока фотонов, вплоть до  $10^6$ — $10^7$  фотонов в секунду. Исследование, проведенное в работе [8], показало, что наилучшими детекторами для данной задачи являются шевронная сборка и Z-сборка микроканальных пластин. Наряду с высокой линейностью регистрации — 2500 регистрируемых событий на  $1\text{ mm}^2$  входного окна детектора в секунду, что соответствует  $10^6$  регистрируемых событий в секунду всей апертурой детектора (20 мм), они обладают малыми, 1—4 импульсов/с, темновыми шумами. Перед входом детектора устанавливается сетка, на которую подается потенциал — 0,4 кВ относительно входа детектора. Эта сетка, во-первых, увеличивает эффективность регистрации фотонов, за счет возврата не попавших в умножительный канал электронов, выбитых падающим фотоном, и во-вторых, подавляет фоновый сигнал, вызываемый рассеянными в камере рефлектометра электронами.

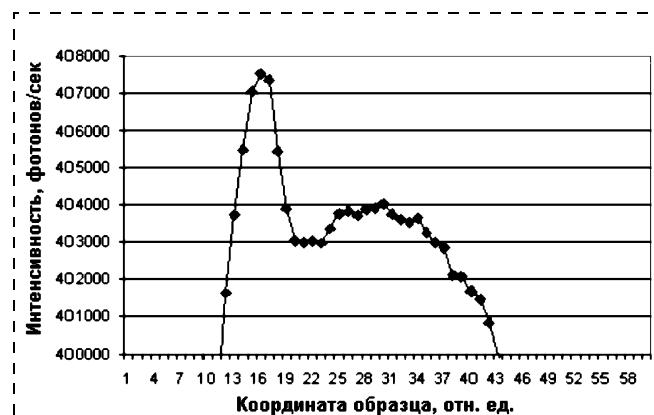


Рис. 6. Усредненная по 10 измерениям зависимость интенсивности отраженного излучения от координаты точки падения на Mo/Si МЗ, проэкспонированное к мощному источнику ЭУФ-излучения

Возможности данного рефлектометра в смысле разрешения малых изменений коэффициентов отражения иллюстрируются рис. 6, где приведена усредненная по 10 измерениям зависимость интенсивности отраженного излучения от координаты точки падения на образец. Образец представляет собой Mo/Si МЗ, проэкспонированное к мощному источнику ЭУФ излучения. Следует отметить, что на рисунке представлена только вершина этой зависимости. Как видно из рисунка, прибор обеспечивает надежное разрешение особенностей кривых отражения на уровне 0,1 %.

Несмотря на то, что данный рефлектометр предназначен для исследования влияния мощных источников ЭУФ излучения на коэффициенты отражения многослойных зеркал, он с успехом может быть использован и для других научных и технических задач, имеющих отношение к литографии 13,5 нм. Например, он может быть встроен в технологическую цепочку по производству масок для оперативной аттестации их отражательных характеристик. Высокая интенсивность излучения на длине волны 13,5 нм ( $\text{Si } L_\alpha$  линия) позволяет использовать этот прибор для исследования фоторезистов для ЭУФ диапазона и калибровки полупроводниковых детекторов. Рабочая длина волны прибора может быть расширена как в длинноволновую ( $\lambda \approx 50$  нм), так и коротковолновую область спектра, до 3,12 нм, области, для которой еще есть возможность изготовления высокоотражающих МЗ нормального падения [9].

### 3. Разборная рентгеновская трубка

Помимо оптимизации оптических схем рефлектометров, яркость и спектральная "чистота" источников ЭУФ излучения играют ключевую роль для

прецизионной рефлектометрии. В настоящее время лазерная [10] и газоразрядная плазма [11] используются в качестве лабораторных источников ЭУФ излучения. Несмотря на высокую яркость этих источников, они имеют ряд существенных недостатков. Во-первых, эти источники заметно загрязняют оптические элементы рефлектометра. Чтобы загрязнения минимизировать, приходится дополнительно устанавливать сложные системы их устранения [12], что существенно усложняет и удороожает прибор. Другой проблемой является сложность спектра, производимого данными источниками. Наличие большого числа близко расположенных спектральных линий приводит к существенному росту фонов в монохроматоре, что снижает точность измерений абсолютных значений коэффициентов отражения зеркал. Еще одной проблемой является низкая эмиссионная способность малогабаритных лабораторных плазменных источников в коротковолновой области спектра ( $\lambda \approx 1$  нм).

Перечисленных проблем лишены рентгеновские трубы (РТ), первоначально разработанные для генерации жесткого ( $\lambda \approx 0,1$  нм) рентгеновского излучения. Однако использование РТ в мягком рентгеновском (МР) и ЭУФ диапазонах имеет ряд принципиальных особенностей, главной из которых является отсутствие окна, разделяющего объемы РТ и спектрометра. Отсутствие окна определяется сильным поглощением МР и ЭУФ излучения всеми материалами. Длина поглощения меняется от 10 до 100 нм в зависимости от материала и длины волны. Сильное поглощение излучения приводит и к другой проблеме — сильному влиянию загрязнений поверхности анода на интенсивность эмиссионной линии. Загрязнение анода продуктами испарения материала термокатода на уровне десятков нанометров приводит к падению интенсивности в разы. Для чистки анода приходится вскрывать трубку на атмосферу. Однако по технологии производства РТ после вскрытия на атмосферу она должна быть прогрета при температуре порядка 600–800 °C в течение 6–8 ч в вакууме ниже, чем  $10^6$  тор (133,3 мкПа) [13]. В противном случае в процессе работы элементы конструкции трубы будут обезгаживаться, что приведет к отравлению термокатода, т. е. потере термоэлектронной эмиссии. Для ее восстановления необходимо увеличить температуру термокатода. Повышенная температура термокатода приводит к увеличению испарения материала, и соответственно, к большему загрязнению анода и сокращению времени жизни термокатода. Очевидно, прогревать трубку после каждого вскрытия (1–2 раза в день) практически невозможно. Поэтому у коммерчески доступных РТ для МР и ЭУФ излучения мощность и

время жизни термокатода на порядок ниже, чем у отпаянных РТ. Важно также отметить, что систематическое падение интенсивности линии в процессе измерений отрицательно влияет на точность измерений.

Для решения этих проблем была разработана новая разборная РТ, схема которой приведена на рис. 7. В этой трубке для электронной пушки используется в качестве материала термокатода ториевый вольфрам W + ThO<sub>2</sub>, имеющий работу выхода 3,2 эВ. Для сравнения работа выхода чистого вольфрама равна 4,54 эВ [14]. Помимо уменьшения рабочей температуры термокатода примерно на 300–500 °C, этот материал устойчив к ионной бомбардировке, инертен к атмосфере и не отравляется в рабочем состоянии при вакууме ниже  $10^{-5}$  тор (133,3 ·  $10^{-5}$  мкПа) [15]. В зависимости от формы фокусирующего электрода трубка может генерировать как ленточный, площадью (1 × 10) мм<sup>2</sup>, так и квазиточечный, (1 × 1) мм<sup>2</sup>, пучки. В первом случае ток пучка может достигать 100 мА, во втором — 10 мА. Мишени различных материалов, до восьми штук, привариваются к водоохлаждаемому медному держателю. Держатель мишени может вращаться, таким образом, обеспечивая замену мишени без разгерметизации трубы. Для чистки мишени от загрязнений предусмотрен ионный источник. Время чистки мишени составляет от 5 до 30 мин, в зависимости от степени загрязнения. Все конструктивные элементы трубы изготовлены в сверхвысоковакуумном исполнении, за исключением ввода вращения держателя мишени. В этом вводе используется фторопластовая втулка. Корпус трубы охлаждается проточной водой. Детальное описание трубы можно найти в [16].

Интенсивности некоторых линий в МР диапазоне (число фотонов, эмитированных в полосу

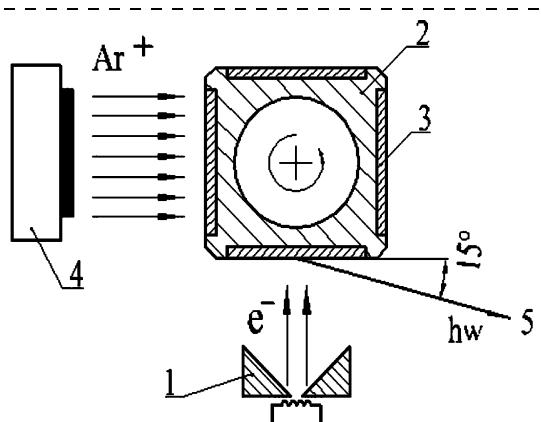


Рис. 7. Схема рентгеновской трубы:

1 — электронная пушка, 2 — водоохлаждаемый держатель мишени; 3 — мишень; 4 — ионная пушка; 5 — пучок фотонов

Таблица 2

**Интенсивности некоторых линий,  
полученных с помощью новой РТ**

Материал мишени	Спектральная линия	Длина волны, нм	Интенсивность, фотон/(с · 0,01 нм · мА)
InP	$PK_{\alpha}$	0,616	300
Si	$SiK_{\alpha}$	0,713	1400
Al	$AlK_{\alpha}$	0,834	1500
Fe	$FeL_{\alpha}$	1,759	500
Cr	$CrL_{\alpha}$	2,164	660
Cr, Al, Fe	$OK_{\alpha}$	2,362	260
Ti	$TiL_1$	3,136	500
C	$CK_{\alpha}$	4,47	3200

длин волн 0,01 нм при токе электронного пучка 1 мА), полученные с помощью этой РТ, приведены в табл. 2. Измерения были проведены на рефлектометре, описанном выше в разд. 1. Учитывая, что ток электронного пучка может достигать значения 3...10 мА в зависимости от материала мишени, видим, что такие интенсивности обеспечивают статистическую погрешность измерений на уровне 1 % в широком спектральном диапазоне.

## Заключение

Разработаны недорогие лабораторные рефлектометры для исследования спектральных характеристик элементов рентгеновской оптики, таких как МЗ, зеркала скользящего падения, дифракционные решетки и др. Приборы позволяют проводить спектральные и угловые измерения в диапазоне длин волн 0,6...20 нм. Исследуемые элементы могут иметь практически любую форму отражающей поверхности и размеры до 300 мм. Технические характеристики приборов в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к аттестации оптических элементов для ЭУФ литографии, а также другим приложениям. Простота в управлении этими приборами (для работы с ними достаточно одного оператора), невысокие стоимость и габаритные размеры, возможность их установки, как в лаборатории, так и на производстве, дает данным приборам ряд преимуществ, по срав-

нению с аналогами, использующими синхротронное излучение.

Разработанное в ходе выполнения работ по рефлектометрам сопутствующее оборудование — рентгеновская трубка, детекторы ЭУФ и МР излучения и электроника, могут также найти широкое применение в науке и технике. Уровень конструкторской проработки и кооперация с ведущими отечественными производителями электровакуумного оборудования, позволяют наладить мелкосерийное производство описанных приборов.

*Работа была поддержанна грантами РФФИ № 02-02-17122 и № 03-02-17457.*

## Список литературы

1. Attwood D. Soft X-rays and extreme ultraviolet radiation, Cambridge University Press, 1999.
2. Joint report ASML, Canon, Nikon on SEMATECH International EUV Source Workshop. 14 October, 2002. Dallas, TX, USA.
3. Fuchs D., Krumrey M., Muller P., Scholze F., Ulm G. High precision soft X-ray reflectometer // Rev. Sci. Instrum. February 1995. 66 (2). P. 2248—2250.
4. Chkhalo N. I., Fedorchenko M. V., Kovalenko N. V. et. al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1995. A 359. P. 121—126.
5. Зуев С. Ю., Митрофанов А. В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2002. № 1. С. 81—83.
6. Lohman M., Klabunde F., Blasing J., Veit P., Drusdau T. // Thin Solid Films. 1999. 342. P. 127.
7. Андреев С. С., Зуев С. Ю., Клюенков Е. Б. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2003. № 2. С. 6—9.
8. Бибушкин М. С., Забродин И. Г., Пестов А. Е. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2003. № 7. С. 5—8.
9. Andreev S. S., Akhsakhalyan A. D., Bibishkin M. S., et. al. // Central European Journal of Physics. 2003. 1. P. 191—209.
10. Gullikson E. M., Underwood J. H., Batson P. C., Nikitin V. // Journal of X-Ray Science and Technology. 1992. 3. P. 289—299.
11. Борисов Б. М., Виноходов А. Ю., Кириохин Ю. Б. и др. // Материалы Совещания Рентгеновская Оптика — 2003. С. 69—78. Нижний Новгород, 11—14 марта 2003.
12. Sekiyama K., Kanda T., Hatano T. et. al // Proceedings The 6<sup>th</sup> International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures, 14, Chamonix Mont-Blanc, March 3—7 2002, France.
13. <http://www.mms.rvh.mcgill.ca/MedImgs/xrayge.htm>
14. Физические величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат. 1991. — С. 574.
15. Кудинцева Г. А., Мельников А. И., Морозов А. В., Никонов Б. П. Термоэлектронные катоды / Под. общей ред. Н. Д. Девяткова. М.—Л.: Энергия, 1966. — С. 133.
16. Бибушкин М. С., Забродин И. Г., Клюенков Е. Б. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. 2003. № 2. С. 41—45.

УДК 621.374.4

Д. Е. Балабанов<sup>1</sup>, канд. техн. наук,С. А. Никитов<sup>1, 2</sup>, чл.-корр. РАН,<sup>1</sup>Московский физико-технический институт  
(государственный университет)<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники РАН,  
г. Москва

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ МИКРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАССЕЯНИЯ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

*Предложена и апробирована методика определения пространственного распределения микромагнитных полей с использованием компьютерной магнитооптической "визуализации". Проанализированы факторы, определяющие чувствительность системы магнитооптической визуализации как по величине вращения Фарадея, так и по магнитному полю, перпендикулярному к плоскости магнитооптической пленки. Определены оптимальные условия регистрации и наблюдения изображения доменных структур с помощью ПЗС-видеокамеры. Найден теоретический предел чувствительности по углу фарадеевского вращения.*

### Введение

В настоящее время для магнитооптической визуализации пространственно неоднородных магнитных полей широко применяется компьютерная микроскопия, смысл которой заключается в соединении с помощью ПЗС-видеокамеры, прибора с зарядовой связью, поляризационного микроскопа и персонального компьютера, что позволяет не только выводить получаемое визуализируемое "изображение" магнитных полей на экран монитора, но и обрабатывать получаемое изображение. В качестве визуализирующих структур в основном применяют эпитаксиальные пленки ферритов-гранатов (ЭФГП) с плоскостным расположением вектора намагниченности [1]. Основные принципы магнитооптической визуализации известны и подробно описаны в литературе [2]. Качество и цветовой контраст изображения зависит от многих факторов: магнитных и магнитооптических свойств визуализирующей магнитной структуры, дисперсионных параметров источника света, а также его мощности, условий наблюдения (в частности, угла разворота и направления анализатора), качества поляризаторов и т. д. Нахождение числовых значений магнитных полей необходимо для определения магнит-

ных параметров исследуемых структур. К настоящему времени все попытки решения указанной задачи ограничивались либо только калибровкой по нормальной компоненте поля рассеяния [3], либо с использованием специальных модельных представлений [4].

Следует отметить, что при непосредственном визуально-микроскопическом наблюдении доменной структуры (ДС) наилучший контраст достигается, когда поляризатор и анализатор находятся в положении почти "скрещивания". В то же время при использовании видеокамеры с выводом изображения ДС на экран монитора наилучшее качество изображения достигается, когда поляризатор и анализатор находятся в полуоткрытом положении. Очевидно, что это различие связано прежде всего с тем, что человеческий глаз и ПЗС-камера по своим оптическим свойствам являются совершенно различными "приборами". Например, глаз человека фиксирует контраст ДС, причем разница в освещенности должна быть на уровне не менее 20 % [5], в то время как матрица ПЗС измеряет в относительных единицах абсолютную интенсивность составляющих света: красного, зеленого, синего (R, G, B).

Следовательно, формулировка оптимальных условий наблюдения при магнитооптической визуализации для компьютерной микроскопии, а также нахождение максимальной чувствительности по углу фарадеевского вращения также являются актуальными при определении пространственного распределения микромагнитных полей рассеяния. Данная статья и посвящена разработке и применению такой методики определения пространственного распределения микромагнитных полей с использованием компьютерной магнитооптической "визуализации".

### Методика определения нормальной и плоскостной компонент магнитных полей при магнитооптической визуализации

В однодоменной магнитной пленке поведение вектора намагниченности, находящегося под воздействием магнитного поля, определяется минимумом суммы энергий анизотропии, размагничивающей и магнитостатической, что в результате приводит к уравнению [2]

$$H_k^* = \frac{H_{\parallel}}{\sin \theta} - \frac{H_{\perp}}{\cos \theta}, \quad (1)$$

где  $H_k^* = \frac{2K_u}{M_s} - 4\pi M_s$  — эффективное поле одноосной анизотропии;  $K_u$  — константа одноосной

анизотропии;  $M_s$  — намагниченность насыщения;  $H_{\parallel}$  — плоскостная компонента магнитного поля;  $H_{\perp}$  — нормальная компонента магнитного поля;  $\theta$  — угол между вектором намагниченности и нормалью к плоскости магнитооптической пленки, причем значение  $\cos\theta$  пропорционально значению фарадеевского вращения.

Способ измерения этой величины с помощью ПЗС-матрицы будет описан ниже. Величина  $H_k^*$  является характеристикой материала и определяется в результате независимых измерений, например, с помощью магнитооптического, вибрационного или торсионного магнитометра. Максимальное значение фарадеевского вращения ЭФГП является характеристикой образца и также определяется независимым методом. Следовательно, в одном уравнении (1) остаются два неизвестных (величины полей  $H_{\parallel}$  и  $H_{\perp}$ ). Для того чтобы их определить, необходимо ввести еще одно независимое уравнение, которое можно получить, если на магнитооптическую структуру воздействовать известным малым (по сравнению с полем перемагничивания визуализируемой магнитной структуры) нормальным магнитным полем  $\Delta H_{\perp}$ . Тогда получается следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} H_k^* &= \frac{H_{\parallel}}{\sin\theta_1} - \frac{H_{\perp}}{\cos\theta_1}; \\ H_k^* &= \frac{H_{\parallel}}{\sin\theta_2} - \frac{H_{\perp} + \Delta H_{\perp}}{\cos\theta_2}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

откуда определяем искомые величины

$$H_{\perp} = \frac{H_k^* \left( 1 - \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} \right) + \frac{\Delta H_{\perp}}{\cos\theta_2}}{\frac{\tg\theta_1}{\sin\theta_2} - \frac{1}{\cos\theta_2}}, \quad (3)$$

$$H_{\parallel} = H_k^* \sin\theta_1 = \frac{H_k^* \left( 1 - \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} \right) + \frac{\Delta H_{\perp}}{\cos\theta_2}}{\frac{\tg\theta_1}{\sin\theta_2} - \frac{1}{\cos\theta_2}} \tg\theta_1. \quad (4)$$

Косинусы углов  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  для пленок с плоскостной анизотропией определяются как отношения величины фарадеевского вращения ( $\phi$ ) к максимальному значению фарадеевского вращения ( $\phi_{\max}$ ), которое достигается в поле насыщения [4].

Углы  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  — это углы между вектором намагниченности и нормалью к плоскости магнитооп-

тической пленки при отсутствии и наличии дополнительного внешнего поля  $\Delta H_{\perp}$  соответственно. Таким образом, процесс измерения угла  $\theta$  сводится к определению соотношения  $\phi/\phi_{\max}$  в каждой точке полученного "изображения". Для решения этой задачи разработана методика, основанная на анализе магнитооптических "изображений" магниточувствительной ЭФГП для различных магнитных состояний.

При использовании в качестве системы регистрации сигнала ПЗС-матрицы измеряются интенсивности R, G, B (красной, зеленой, синей) составляющих излучения в каждом "пикселе" матрицы. В современных системах каждой составляющей цвета отводится восемь битов. Это означает, что интенсивность каждой составляющей может изменяться дискретно в диапазоне чисел от 0 до 255 в десятичной системе.

Выражение для интенсивности ( $J$ ) света, прошедшего через систему поляризатор—образец—анализатор, согласно закону Малюса имеет вид [5]

$$J = I_0 e^{-\alpha h} (\sin^2(\gamma \pm \phi) + p), \quad (5)$$

где  $I_0$  — интенсивность падающего света;  $\alpha$  — коэффициент поглощения магнитной среды;  $h$  — толщина ЭФГП;  $\gamma$  — угол между осями поляризатора и анализатора;  $\phi$  — величина фарадеевского вращения (ЭФГП);  $p$  — числовой коэффициент, характеризующий качество поляризаторов (для пленочных поляроидов  $p \approx 10^{-3} \div 10^{-4}$ ).

Очевидно, что измеряемая ПЗС-матрицей интенсивность света  $J$  не может принимать значения выше 255.

Ниже описывается методика определения  $\phi$  с использованием результатов измерения интенсивности света ПЗС-матрицей. Запишем уравнение (5) для следующих магнитных состояний "визуализирующей" ЭФГП при условии  $\gamma, \phi \ll 1$  и  $\gamma \geq \phi$ :

- ЭФГП находится в нулевом поле смещения

$$J_{zero} = I(\gamma^2 + p); \quad (6)$$

- ЭФГП находится под воздействием поля насыщения  $+H_S$

$$J_{max} = I((\gamma + \phi_{\max})^2 + p); \quad (7)$$

- ЭФГП находится под воздействием поля насыщения  $-H_S$

$$J_{min} = I((\gamma - \phi_{\max})^2 + p); \quad (8)$$

- ЭФГП находится под воздействием магнитных полей рассеяния

$$J = I((\gamma + \varphi)^2 + p), \quad (9)$$

где  $I = I_0 e^{-\alpha h}$ .

Комбинируя выражения (6), (7), (9), можно записать:

$$\frac{J - J_{zero}}{J_{max} - J_{zero}} = \frac{(\gamma + \varphi)^2 - \gamma^2}{(\gamma + \varphi_{max})^2 - \gamma^2} \quad (10)$$

или

$$\frac{J - J_{zero}}{J_{max} - J_{zero}} = \frac{\varphi}{\varphi_{max}} \frac{2\gamma + \varphi}{2\gamma + \varphi_{max}},$$

что равносильно

$$\frac{J - J_{zero}}{J_{max} - J_{zero}} = \frac{\varphi}{\varphi_{max}} \frac{2\frac{\gamma}{\varphi_{max}} + \frac{\varphi}{\varphi_{max}}}{2\frac{\gamma}{\varphi_{max}} + 1}. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что если наилучшие условия наблюдения таковы, что угол разворота анализатора  $\gamma \gg \varphi_{max}$ , то

$$\frac{\varphi}{\varphi_{max}} \approx \frac{J - J_{zero}}{J_{max} - J_{zero}}, \quad (12)$$

т. е. фарадеевское вращение пропорционально интенсивности света, измеряемой ПЗС-матрицей. Однако, если условия наблюдения таковы, что  $\gamma \sim \varphi_{max}$ , то приближение (12) неправомерно, поскольку по сравнению с решением (11) ошибка может достигнуть  $\sim 30\%$ . Поэтому, используя выражения (6)–(9), выразим  $\gamma$  и подставим его в (11), в результате чего получим

$$\frac{J_{max} - J_{zero}}{J_{max} - J_{min}} = \frac{2\gamma + \varphi_{max}}{4\gamma}, \quad (13)$$

откуда

$$\frac{\varphi_{max}}{\gamma} = 2 \frac{(J_{max} - J_{zero}) - (J_{zero} - J_{min})}{J_{max} - J_{min}}. \quad (14)$$

Далее подставляем полученное выражение в (11) и получаем

$$\frac{\varphi}{\varphi_{max}} = a \left( \sqrt{1 + \frac{2b}{a} + \frac{b}{a^2}} - 1 \right) \approx b + \frac{b}{2a}, \quad (15)$$

где

$$a = \frac{1}{2} \frac{J_{max} - J_{min}}{(J_{max} - J_{zero}) - (J_{zero} - J_{min})}; \\ b = \frac{J - J_{zero}}{J_{max} - J_{zero}}. \quad (16)$$

Таким образом, чтобы определить угол между вектором намагниченности в визуализирующей ЭФГП и нормалью к пленке (угол  $\theta_1$ ), в каждом "пикселе" необходимо "зафиксировать" магнитооптические "изображения" четырех магнитных состояний (6)–(9) и провести их "обработку" по формулам (15), (16).

Однако, чтобы определить компоненты магнитных полей рассеяний по формулам (3), (4), необходимо дополнительное магнитооптическое "изображение" исследуемых магнитных полей при воздействии заданного нормального поля смещения ( $\Delta H_\perp$ ), что позволит определить аналогичным образом угол  $\theta_2$ .

Выражения для углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$  принимают вид

$$\cos\theta_1 = \frac{\varphi_1}{\varphi_{max}}; \quad \cos\theta_2 = \frac{\varphi_2}{\varphi_{max}}. \quad (17)$$

Далее, используя соотношения (14)–(16), а также (3), (4), находим распределение по площади нормальной, плоскостной компонент магнитного поля рассеяния, а также угла  $\theta$ .

Для апробации предложенной методики использовалась висмутсодержащая ЭФГП, характеризующаяся следующими параметрами:  $h = 2,2$  мкм,  $H_k^* = -57$  кА/м,  $\varphi_{max} = 1,5^\circ$ . На рис. 1 представлено магнитооптическое "изображение" магнитной записи. На рис. 2–4 показаны соответствующие распределения компонент полей рассеяния и угла

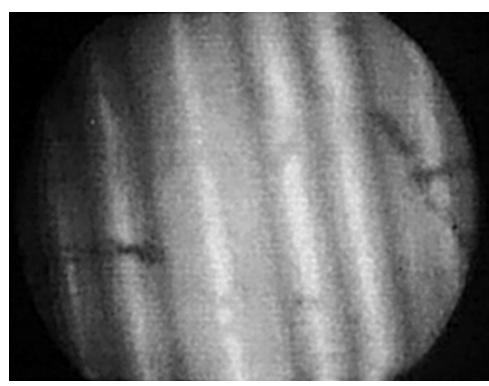
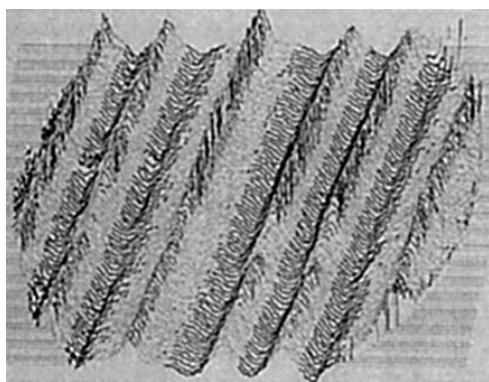
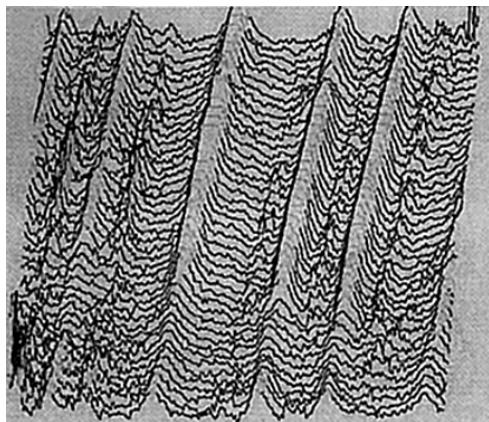


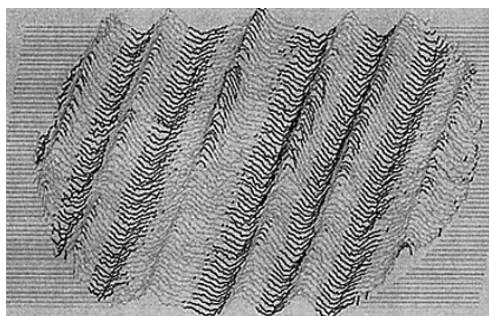
Рис. 1. Магнитооптическое "изображение" магнитной записи



**Рис. 2. Распределение нормальной компоненты поля рассеяния.  
Диапазон изменения  $-9,6 \div +20$  кА/м**



**Рис. 3. Распределение плоскостной компоненты поля рассеяния.  
Диапазон изменения  $-18,4 \div +28$  кА/м**



**Рис. 4. Угол между вектором магнитного поля рассеяния и плоскостью ЭФГП.  
Интервал  $-11,4^\circ \div +20^\circ$**

между вектором намагниченности и плоскостью пленки. При этом нормальная компонента поля изменяется в диапазоне  $9,6 \div 20$  кА/м, плоскостная — в диапазоне  $-18,4 \div +28$  кА/м, угол между вектором намагниченности и плоскостью ЭФГП лежит в интервале  $11,4 \div 20^\circ$ . Следует отметить, что поскольку и удельное значение фарадеевского вращения, и коэффициент оптического поглощения имеют дисперсионную зависимость, то чувствительность системы по каждой из компонент ( $R$ ,  $G$ ,  $B$ ) определяется толщиной ЭФГП [3, 5, 6].

#### Регистрация изображения доменной структуры с помощью ПЗС-камеры.

#### Оптимальные условия наблюдения.

#### Теоретический предел чувствительности

Ранее отмечено, что измеряемая ПЗС-матрицей интенсивность падающего света  $J$  не может принимать значения выше 255. Это означает, что если мы будем использовать достаточно мощный источник света и измерять значения  $J$  в зависимости от угла  $\gamma$ , то при определенном угле  $\gamma_0$  система регистрации войдет в насыщение и  $J = J_0$  ( $J_0$  — максимальное значение интенсивности и в принципе может быть равно 255). Критерии определения  $J_0$  будут даны ниже.) Таким образом, выражение (5) можно переписать в виде

$$I_0 e^{-\alpha h} = \frac{J_0}{\sin^2(\gamma_0) + p}. \quad (18)$$

Подставим (18) в (5) и получим закон Малюса для случая, когда фотоприемник входит в насыщение при частично раскрещенных поляризаторах:

$$J = \frac{J_0}{\sin^2(\gamma_0) + p} (\sin^2(\gamma \pm \varphi_{\max}) + p). \quad (19)$$

Далее, чтобы зарегистрировать магнитные домены, необходимо определить разность интенсивностей света, прошедшего через соседние домены:

$$\Delta J = \frac{J_0}{\sin^2(\gamma_0) + p} (\sin^2(\gamma + \varphi_{\max}) - \sin^2(\gamma - \varphi_{\max})) \quad (20)$$

или

$$\Delta J = \frac{J_0}{\sin^2(\gamma_0) + p} \sin 2\gamma \sin 2\varphi_{\max}. \quad (21)$$

Выражение (21) принимает максимальное значение, если  $\gamma = \pi/4$ .

Вместе с тем, если  $\gamma_0 < \pi/4$ , то выражение (21) принимает максимальное значение при условии  $\gamma = \gamma_0$ . Физически это означает, что система регистрации имеет максимальную чувствительность, когда угол разворота анализатора  $\gamma$  такой, что фотоприемник (ПЗС-матрица) находится вблизи насыщения. Следовательно, для наилучшего наблюдения доменов необходимо выполнение следующих условий (при этом  $J < 255$  во всех точках изображения):

$$2\phi_{\max} \leq \gamma_0, \quad \gamma = \gamma_0 - \phi_{\max}. \quad (22)$$

Чтобы определить оптимальную мощность осветителя для достижения максимальной чувствительности, фактически необходимо значение угла  $\gamma_0$ , при котором выражение (21) принимает максимальное значение, при этом  $\gamma = \gamma_0$ , т. е. необходимо найти максимум функции

$$\Delta J = \frac{J_0}{\sin^2(\gamma_0) + p} \sin 2\gamma_0 \sin 2\phi_{\max}. \quad (23)$$

Максимум функции определяется из равенства нулю ее производной:

$$\frac{J_0 \sin 2\phi_{\max} (2 \cos(2\gamma_0) (\sin^2(\gamma_0) + p) - \sin(2\gamma_0) (\sin 2\gamma_0))}{(\sin^2(\gamma_0) + p)^2} = 0. \quad (24)$$

Решением уравнения (24) является

$$\sin(\gamma_0) = \pm \sqrt{\frac{p}{1+2p}} \approx \pm \sqrt{p}. \quad (25)$$

Далее, используя выражения (20), (25) и условие  $\Delta J_{\min} = 2$  (минимальное значение изменения интенсивности излучения, прошедшего через домен, регистрируемое ПЗС-матрицей, равно 1), получаем, что максимальная чувствительность обеспечивается при

$$\phi_{\min} = \frac{\sqrt{p}}{J_0}. \quad (26)$$

Выше уже отмечалось, что  $J$  означает интенсивность света, регистрируемую ПЗС-матрицей в относительных единицах, которая лежит в диапазоне целых чисел от 0 до 255. Экспериментальные измерения показали, что в зависимости от интенсивности падающего света  $J$  изменяется линейно в ди-

пазоне значений 0–200. Далее снижается чувствительность фотоприемной системы. Следовательно, выбираем  $J_0 = 200$ , тогда  $\phi_{\min} \approx 10^{-4}$  рад. Это означает, что при определенных условиях применение ПЗС-камеры существенно повышает чувствительность (как минимум на порядок) по углу фараадеевского вращения по сравнению с обычным визуально-микроскопическим методом.

Динамический диапазон и соответствующая чувствительность визуализирующей ЭФГП ( $\Delta H_{\min}$ ) определяется ее магнитными свойствами (полем насыщения ( $H_s$ ), фараадеевским вращением ( $\phi_{\max}$ ), а также мощностью осветителя, которая определяется условием (22). Выражение для чувствительности ЭФГП по нормальному полю имеет вид

$$\Delta H_{\min} = 2 \frac{H_s}{\Delta J}. \quad (27)$$

Используя соотношения (20) и условия (22), получаем выражение для максимальной чувствительности

$$\Delta H_{\min} = 2 \frac{H_s (\sin^2 \gamma_0 + p)}{J_0 (\sin^2(\gamma + \phi_{\max}) - \sin^2(\gamma - \phi_{\max}))} \quad (28)$$

или

$$\Delta H_{\min} = 2 \frac{H_s (\sin^2 2\phi_{\max} + p)}{J_0 (\sin^2 2\phi_{\max})} \approx \frac{2H_s}{J_0}. \quad (29)$$

Следует отметить, что поскольку чувствительность системы достаточно сильно зависит от мощности и спектральных свойств осветителя, то особые требования предъявляются к однородности освещения по площади исследуемого образца, т. е. необходимо обеспечить равномерность освещенности на уровне не хуже

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{1}{200} = 0,5 \text{ \%}.$$

### Заключение

Итак, в данной статье описана методика количественного определения пространственного распределения микромагнитных полей, суть которой заключается в анализе и обработке полученных магнитооптических "изображений" исследуемых полей. Определены предельные возможности в нахождение параметров магнитных полей при использовании в качестве магниточувствительного элемента висмутсодержащих ЭФГП с плоскостной

магнитной анизотропией, а в качестве фотоприемника — ПЗС-матрицу.

*Авторы выражают благодарность М. Ю. Гусеву и Н. С. Неуструеву за предоставление ЭФГП для магнитооптической визуализации, а также РФФИ за финансовую поддержку, грант 02-02-17166.*

#### Список литературы

1. Рандошкин В. В., Гусев М. Ю., Козлов Ю. Ф., Неустров Н. С. О преимуществах безгистерезисных магнитооптических пленок при использовании в неразрушающей дефектоскопии // ФТТ. 2000. Т. 70. № 3. С. 118—124.

2. Рандошкин В. В., Червоненкис А. Я. Прикладная магнитооптика. М.: Энергоатомиздат, 1990. 318 с.

3. Балабанов Д. Е., Гусев М. Ю., Неустров Н. С., Пономарев Н. В., Никитов С. А. Исследование пространственного распределения микромагнитных полей рассеяния методом магнитооптической визуализации // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 7. С. 868—873.

4. Grechishkin R. M., Goosev M. Yu. et all. High resolution sensitive magneto-optic ferrite-garnet film with planar anisotropy // J. Magn. Magn. Mat. 1996. V.157—158. P. 305—306.

5. Звездин А. К., Котов В. А. Магнитооптика тонких пленок. М.: Наука, 1988. 190 с.

6. Svorotka M., Ubizskii S. et all. Growth and characterization in Bi, Pr- and Bi, Sc-substituted lutetium iron garnet films with planar magnetization for magneto-optic visualization // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 1178—1187.

# РФФИ СТРАНИЧКА РФФИ

*В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 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

### Исследование явлений электропереноса в углеродных трубах и нанотрубных пленках

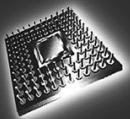
Номер проекта: 98-02-17130

Год представления отчета: 2001

В 2000 г. основные экспериментальные работы были связаны с исследованием влияния магнитного поля на электроперенос на межтрубном уровне в пленках с нормальной ориентацией нанотруб и различной степенью их графитизации. Установлено, что в магнитном поле, перпендикулярном оси нанотруб, нанотрубные пленки являются диамагнетиками, но более слабыми, чем квазидвумерный графит. Снижение степени графитизации нанотруб уменьшает диамагнитную восприимчивость нанотрубной пленки. Проведены измерения магнитосопротивления нанотрубных пленок в зависимости от ориентации нанотруб в слабом магнитном поле и длительности воздействия на них магнитного поля. Установлено, что графитизация нанотруб изменяет характер ориентационной зависимости магнитосопротивления пленки. Обнаружено значительное снижение сопротивления многослойных нанотрубных пленок в результате длительного воздействия магнитного поля. Проведены измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) отдельных однослойных и многослойных нанотруб. Анализ ВАХ однослойных нанотруб показал корреляцию электронных свойств нанотруб с их хиральностью. Проведены измерения ВАХ нанотрубных пленок. Установлено, что протекание достаточно больших токов (1 А) в однослойных пленках практически не вызывает их разогрева. Прове-

дены измерения автоэмиссионных свойств нанотрубных пленок на кремниевых и никелевых подложках. Обнаружено отклонение от линейности в координатах Нордгейма—Фуллера при высоких напряженностях электрического поля. Аномально большие токи автоэмиссии и утонение пленок в процессе эмиссии мы связываем с участием в процессе эмиссии электронов гибридизации. Обнаружен эффект самопроизвольного допирования нанотрубных пленок из многослойных нанотруб материалом подложки, приводящий к значительному уменьшению ее сопротивления. Наблюдалось также увеличение плотности таких пленок и снижение скорости звука. Масс-спектрометрическим методом обнаружено сильное влияние нанотрубной пленки на распределение примесей в приповерхностном слое кремниевой подложки. Значительное увеличение сопротивления приповерхностного слоя подложки мы связываем с локализацией носителей заряда на примесях. Проведен анализ всех полученных в проекте результатов исследований. Установлено, что доминирующую роль в механизме переноса заряда играет электрон-фононное взаимодействие, что делает применение зонной модели не корректным. Предложена новая модель, в которой предполагается полная локализация всех носителей заряда на деформациях графеновой сетки. Перенос заряда осуществляется по механизму прыжковой проводимости при взаимодействии между соседними локальными центрами. Такая модель позволяет достаточно адекватно описать всю совокупность наблюдаемых явлений.

# E•X•P•O ELECTRONICA



8-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ  
ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

8th INTERNATIONAL EXHIBITION FOR ELECTRONIC  
COMPONENTS AND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

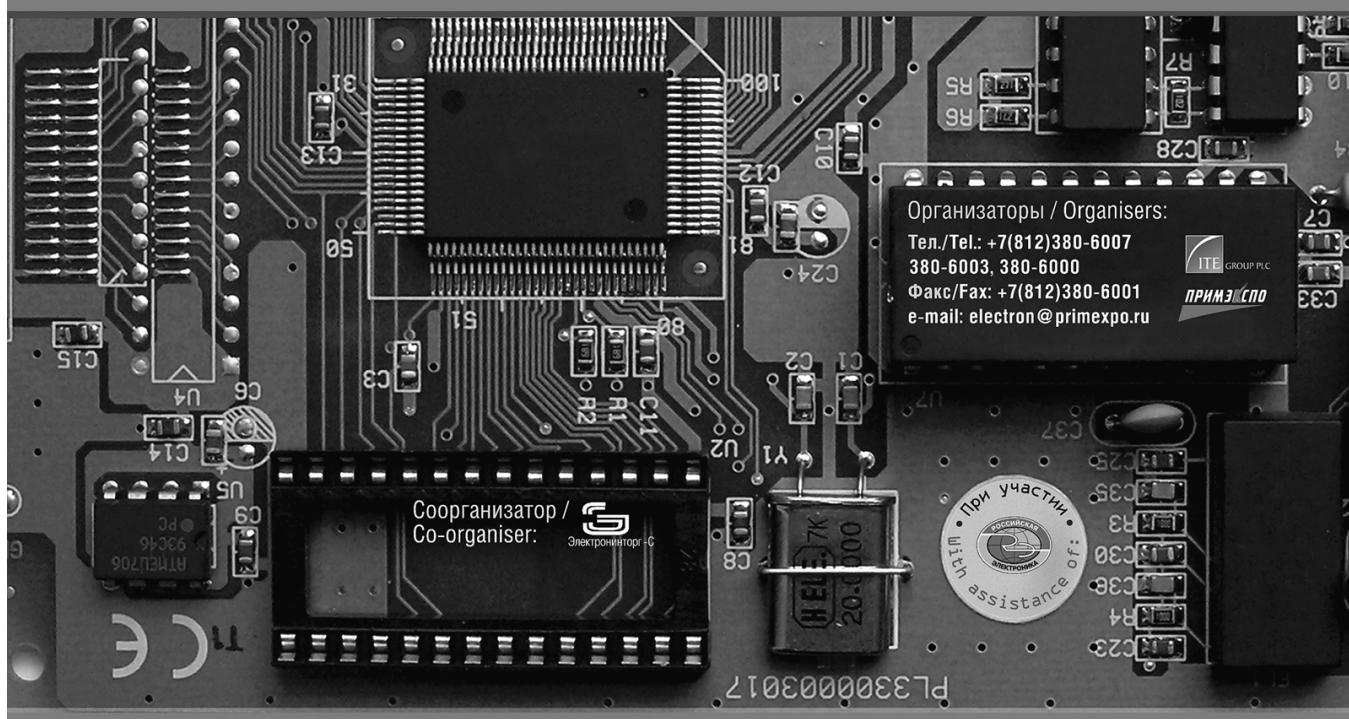
## 5-8 АПРЕЛЯ / APRIL 2005

РОССИЯ, МОСКВА, СК "ОЛИМПИЙСКИЙ"

OLIMPIYSKIY COMPLEX, MOSCOW, RUSSIA

Совместно с / Incorporating:

**ElectronTech** eXpo



При официальной поддержке / The official support:



Министерство промышленности и энергетики Российской Федерации  
Ministry of Industry and Energy of the Russian Federation  
Министерство экономического развития и торговли Российской Федерации  
Ministry of Economic Development and Trade of the Russian Federation  
Министерство информационных технологий и связи Российской Федерации  
Ministry of Information Technologies and Communications of the Russian Federation  
Правительство Москвы  
Moscow government

Информационные спонсоры / Information sponsors:



[www.expolectronica.ru](http://www.expolectronica.ru)

# CONTENTS

**Alekhin V. A.** *One-dimensional Micro-Optical-Electro-Mechanical Systems and Their Application in Devices of display and Registration of the Information* ..... 2

Principles of construction and functioning of projective displays and printers with one-dimensional MOEMS on a basis elastomer and GLV-technology are considered.

**Adamov Yu. F., Somov O. A., Shevchenko E. A.** *Synchronization and Connectivity of Signals in Systems On Chip (SOC)* ..... 8

The research of combined work of IP-blocks (in SOC) and local synchronization devices included in these blocks on high frequencies is carried out in this article. The recommendations on synchronization signals supply at all SOC design stages are given. The basic directions of development of local synchronization devices circuitry are allocated. The basic elements of IP-blocks synchronization subsystems are described. New possible effective decisions and practically implemented circuits are shown.

**Kozlov A. V., Tikhonov R. D.** *Negative Sensitivity Bipolar Magnetotransistor* ..... 19

By means of devises instrument-technological simulating modeling is explored lateral bipolar magnetotransistor (BMT), formed in the well at the outerconnected of substrate with the well. Shown that in the optimized structure BMT occurs a shaping the flows of carriers of charge and their volumetric recombination, which are changed at the influence of magnetic field. Origin concentration-recombination sensitivity BMT gives a motivation a mechanism of arising two signs relative magnetosensitivity on the current. Choice of parameters of structure and state of working BMT in accordance with the install mechanism of sensitivity allows raise relative sensitivity on the current before  $30 \text{ T}^{-1}$ .

**Kravchenko I. V., Konoplev B. G., Ryndin E. A.** *Simulation of Temperature Distribution in a Convection-Based Microaccelerometer* ..... 22

A model of temperature distribution in a convection-based microaccelerometer had been developed. Influence of dimensions of the cavity and temperature of a heater on linearity and sensitivity of microaccelerometer had been analyzed.

**Aristov V. V., Kuyumchyan A. V., Souvorov A. Yu., Ishikawa T., Isoyan A. A., Trouni K. T., Sarkisian E.** *Reconstruction of Fourier-Hologram Using a Zone Plate for Hard x-Ray Radiation* ..... 26

The images of the silicon test object have been studied. An image for in-line hologram for hard X-ray (8–18 KeV) is presented. The transmission of a hologram image for hard X-ray radiation using Fresnel phase zone plate has been investigated. The experimental investigations have been conducted on the station BL29XU, Spring-8.

**Panfilov Yu. V., Samoylovich M. I., Zilova O. S.** *Opal Matrix Surface With Thin Film Coatings Investigation* ..... 29

Thin film deposition methods for synthetic opal substrate are analysed. Vacuum evaporation and ion-plasma sputtering and ion deposition are selected. Multi-source vacuum tool with ion-beam source, magnetron sputtering system and arc evaporator is worked out. Opal matrix surface with thin film coatings topography and one's electric resistance and laser beam reflection are examined.

**Bibishkin M. S., Zabrodin I. G., Zuev S. Yu., Klyuenkov E. B., Pestov A. E., Salashchenko N. N., Chekhonadskih D. P., Chkhalo N. I.** *Laboratory Methods for Investigation of Multilayer Mirrors in Extreme Ultraviolet and Soft X-Ray Region* ..... 34

Two reflectometers in IPM RAS are described. One enables investigation of the angular and spectral characteristics of mirrors with any shape of a reflecting surface in the 0,6–20 nm spectral range. The other, designed especially to study the influence of powerful EUV sources on the reflecting characteristics of multilayer mirrors and provides a resolution of the reflection coefficient variation at a level of 0,1 %.

**Balabanov D. E., Nikitov S. A.** *Investigation of 2D-micromagnetic Stray Fields by Computer Magneto-Optic Visualization Method* ..... 41

The new method for definition of spatial distribution of micromagnetic stray fields by computer magneto-optic visualization is developed and approved. The factors defining magneto-optic visualization system sensitivity are found and analyzed. The analysis considers Faraday rotation angle and the out-of-plane magnetic field. The optimal conditions for registration and observation of domain structures images with CCD camera are defined. The theoretical limit of Faraday rotation angle sensitivity is found.

## For foreign subscribers:

*Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(095) 684-5008. Fax: +7(095) 681-3798*

*The journal bought since november 1999.*

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

**ISSN 1684-6419.**

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

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

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала **(095) 269-5510**. E-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru). Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати. Свидетельство о регистрации № 018929 от 10.06.99.

Дизайнер Т.Н. Погорелова. Технический редактор И.С. Павлова. Корректор Т. Л. Сухорукова

Сдано в набор 02.09.2004. Подписано в печать 08.10.2004. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Усл. кр.-отт. 7,84. Уч.-изд. л. 7,02. Заказ 1659. Цена договорная

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