

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 539.3:621.897

Е. В. Шалобаев, канд. техн. наук,
Санкт-Петербургский государственный институт точной механики
и оптики (технический университет),
В. Е. Старжинский, д-р техн. наук, **С. А. Шилько**, канд. техн. наук,
ГНП "Институт механики металлополимерных систем
им. В. А. Белого НАН Б (г. Гомель, Республика Беларусь)

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ПЕРЕДАЧ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Зубчатые микромеханизмы МЭМС:
опыт производства и постановка задач
на перспективу**

Проведен анализ зарубежных и отечественных разработок в области механических компонентов микроэлектромеханических систем, вскрыты проблемы и намечены пути их разрешения.

В течение последних десятилетий наблюдается общая тенденция к миниатюризации технических систем [1–3]. Бурное развитие микроэлектроники приводит к объединению все большего числа функций в единичных миниатюрных компактных устройствах. Такая же тенденция характерна и для механических систем, включая механические приводы. В англоязычной технической литературе подобные изделия носят название Microelectromechanical Systems (MEMS) и относятся к наиболее интенсивно развивающейся области микросистемной техники (microsystem technology), которая представляет собой мехатронику на микроуровне, или микромехатронику [4]. Последний термин утвержден комитетом по терминологии Международной федерации по ТММ в сентябре 2002 г. по предложению одного из авторов этой публикации [5].

При дальнейшем изложении материала мы будем использо-

вать аббревиатуру русскоязычного аналога — МЭМС. Характерной особенностью МЭМС является синергетическое взаимодействие электрических и механических связей [6], что и присуще мехатронным объектам [7].

Во многих областях жизнедеятельности человека, например в медицине, необходимы приводы с габаритными размерами в пределах одного миллиметра с крутящим моментом до нескольких десятых микроныютометра. Такие миниатюрные приводы представляют собой специфические мотор-редукторы, которые до недавнего времени имели диаметр не менее 8 мм. В 1997 г. были разработаны приводы диаметром 5 и 3 мм [8]. В настоящее время появились еще более миниатюрные приводы. Так, например, компания Faulhaber Motoren совместно с исследовательским институтом Institut Für Mikrotechnik Mainz GmbH разработала микроэлектродвигатель, имеющий внеш-

ний диаметр всего 1,9 мм [9]. Ряд разработок в этом направлении выполнен в Центре микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета [10]. Для того чтобы адаптировать частоту вращения в $100\,000\text{ мин}^{-1}$ и крутящий момент в $7,5\text{ мкН}\cdot\text{м}$ к требованиям большинства технических устройств, создаются приводные микромеханизмы с такими же размерами и высоким передаточным отношением. При общем диаметре редуктора, равном 1,9 мм, зубчатые колеса отдельных ступеней имеют диаметр не более 0,5 мм.

Важно отметить, что миниатюризация механизмов приводит к масштабному эффекту, который проявляется, с одной стороны, в возрастании роли трения и ухудшении теплоотвода в микромеханизмах, с другой — в повышении прочности деталей [4, 11].

Как и в устройствах традиционного размерного исполнения, типичными узлами МЭМС являются трибосопряжения (подшипники, зубчатые колеса, условно-неподвижные соединения и т. д.). Конструкция опор при миниатюризации так же претерпевает изменения — вместо строго цилиндрических поверхностей используют звездчатые, углубления в которых выполняют роль карманов для продуктов изнашивания.

Однако прочностные и триботехнические расчеты сопряжений МЭМС практически не разработаны, поскольку переход на рассматриваемый масштабный уровень привел к появлению специфических явлений, существенно влияющих на характеристики трения, изнашивания и контактной прочности [4].

Масштабный эффект в МЭМС может быть обусловлен близостью

характерных размеров структурных составляющих материала деталей, самих деталей и адсорбированных их поверхностью слоев влаги. К примеру, модуль зацепления сверхминиатюрных зубчатых колес (40—100 мкм) становится соизмеримым с размером надмолекулярных структур и армирующих фаз из полимерных композиционных материалов, используемых для изготовления указанных деталей.

Этот эффект проявляется также в возрастании роли поверхностных сил трения и адгезии по сравнению с объемными силами (например, инерционными) [12].

Детали, включающие тонкие пленки микрометрической толщины, оказываются весьма чувствительными к указанным поверхностным силам. В результате существенно (а иногда и катастрофически) снижается надежность МЭМС, вплоть до полного разрушения деталей в результате схватывания сопряженных поверхностей.

В целях стабильного функционирования микросистемной техники разрабатывается новое поколение адаптивных (динамически оптимальных) материалов [13] (в частности, на основе пьезоконструктов), в которых реализуется принцип авторегулирования условий контактного взаимодействия путем изменения объемных (деформационных) и поверхностных (фрикционных, адгезионных) характеристик. В этом случае появляется дополнительная нелинейность, обусловленная возникновением контура электро-механической обратной связи.

Вышеназванные факторы не учитываются в практике расчета и конструирования традиционных сопряжений деталей машин. Необходимо модифицировать существующие расчетные схемы и развивать методы прикладной механики (в первую очередь — методы граничных и конечных элементов) для прочностного анализа

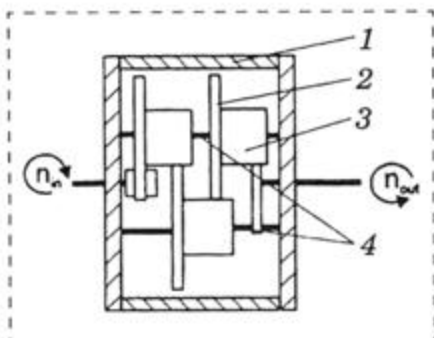


Рис. 1. Типичный простой (рядовой) микромеханизм по схеме уступом

трибосопряжений микроскопических размеров. Анализ подобных задач актуален также в рамках механики контактного разрушения [14], например, при разработке методов диагностики, основанных на индентировании материалов.

Поскольку микроэлектронные технологии основаны на использовании кремния и его оксидов, механические и трибологические характеристики которых очень низки, это требует применения специальных сверхтонких покрытий или методов модификации поверхностного слоя, например, ионной имплантации или лазерной обработки [15].

Проектирование МЭМС, таким образом, требует не только совместных усилий специалистов в области механики и электрони-

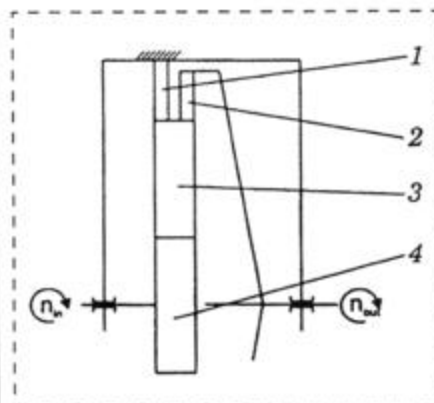


Рис. 3. Планетарный механизм типа Wolfram

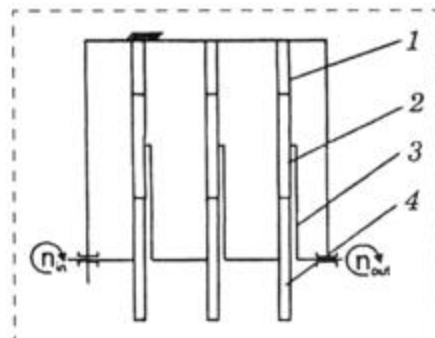


Рис. 2. Трехступенчатый планетарный механизм:

1 — колесо с внутренними зубьями; 2 — сателлит; 3 — водило; 4 — солнечное зубчатое колесо

ки, но и дополнительных исследований. К примеру, существующие ГОСТы распространяются на модули до 0,1 мм и уже не охватывают достигнутых значений, равных 30—40 мкм.

Как показывает опыт проектирования микроприводов, для реализации высоких передаточных отношений используются многоступенчатые рядовые (простые) (рис. 1), многоступенчатые планетарные (рис. 2), в том числе типа Wolfram (рис. 3), механизмы и планетарные приводы, реализующие высокие передаточные отношения в одной ступени (рис. 4) [16].

Традиционная конструкция рядового зубчатого микромеханизма представляет собой многоступенчатый редуктор по схеме уступом с передаточным отноше-

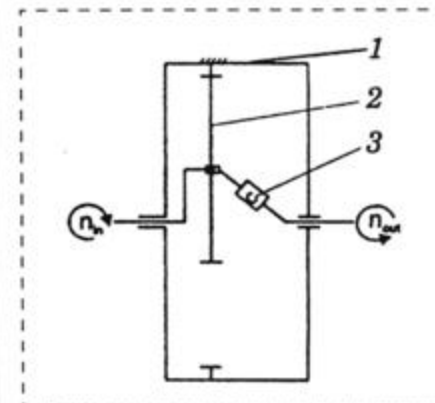


Рис. 4. Планетарная зубчатая передача с высоким передаточным отношением в одной ступени

нием до 3,5 в одной ступени, валы которого фиксируются в подшипниковых опорах высокоточного корпуса (см. рис. 1). Поскольку планетарные передачи позволяют реализовать более высокие передаточные отношения и обеспечивают распределение нагрузки между тремя или четырьмя сателлитами (см. рис. 2), они, несмотря на сложности, связанные с миниатюризацией таких конструкций, получают предпочтительное распространение в зубчатых микромеханизмах. В специфической планетарной передаче с высоким передаточным отношением в одной ступени (рис. 4) эффект достигается малой разностью чисел зубьев сателлита и колеса с внутренними зубьями. Вращение сателлита через промежуточное колесо передается на выходной вал, который располагается соосно входному валу.

Рассмотрим два типа приводных механизмов, реализованных на практике.

Конструкция двухступенчатого привода типа Wolfrom (см. рис. 3) демонстрирует возможности производства зубчатых микромеханизмов методами микротехнологии. Привод включает ведущее солнечное колесо 4 на входном валу, которое через три сателлита 3, зацепляющихся с неподвижным колесом с внутренними зубьями 1, передает вращение колесу также с внутренними зубьями 2, закрепленному на выходном валу. В соответствии с конструктивными особенностями такого привода достигаются следующие преимущества:

- благодаря соответствующей коррекции зацепления обеспечивается малая разность чисел зубьев неподвижного и подвижного колес, что позволяет реализовать высокое передаточное отношение;
- нет необходимости использовать водило, так как сателлиты поддерживаются солнечным колесом.

Одновенцовые зубчатые колеса такой конструкции удобны для изготовления методами микротехнологии. Корпус, алмазные подшипники входного и выходного валов изготавливают, используя технологии прецизионной механики.

Технические характеристики двухступенчатого привода типа Wolfrom

Модуль зацепления, мкм . . .	38
Ширина, мкм:	
зубчатого венца сателлитов .	500
колес с внутренними зубьями	250
Передаточное отношение . . .	45

Недостаток схемы — постоянное, неизменяемое передаточное отношение и более низкий КПД

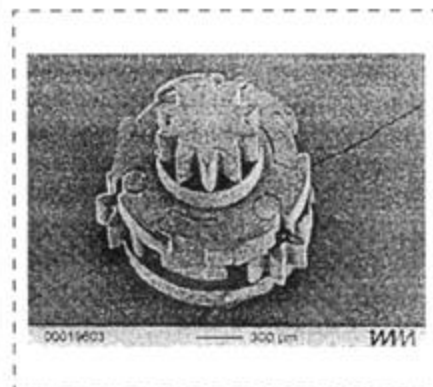


Рис. 5. Водило многоступенчатого планетарного механизма в сборе с сателлитами и солнечным колесом

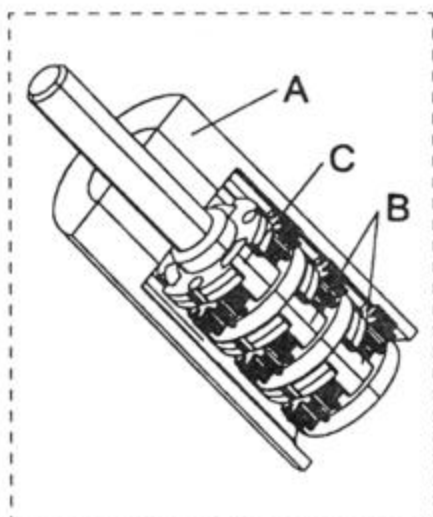


Рис. 6. Конструкция трехступенчатого планетарного механизма

по сравнению с простыми многоступенчатыми типами механизмов.

Для тиражирования более подходящим является многоступенчатый планетарный привод (см. рис. 2), элементы которого могут многократно воспроизводиться методом микролития под давлением. Солнечное колесо, смонтированное на валу микроэлектродвигателя, является ведущим. Сателлиты с диаметром вершин зубьев 560 мкм вращаются на осях, которые зафиксированы в пространстве между двумя пластинами водила (рис. 5 [17]); жесткие соединяющие элементы конструкции расположены между сателлитами. Солнечное колесо каждой следующей ступени (рис. 6, В [17]), а также выходной вал последней ступени (рис. 6, С [17]) фиксируются в верхней части водила.

Технические характеристики многоступенчатого планетарного привода

Модуль зацепления, мкм .	55
Ширина зубчатого венца сателлитов и солнечных колес, мкм	300
Крутящий момент, мкН·м	250
Передаточные отношения ступеней	3,6; 4,71 и 5,33

Комбинация этих передаточных отношений в приводном механизме с числом ступеней от двух до пяти обеспечивает широкий диапазон варьирования общего передаточного отношения.

Заключение

Методы и средства на основе микросистем становятся неотъемлемой частью высоких технологий практически во всех областях современной техники. В настоящее время рыночная стоимость разнообразных МЭМС оценивается многомиллионными суммами и имеет огромный ежегодный прирост. Широкое применение этих систем инициировало

бурное развитие технологий изготовления элементов миниатюрных механических приводов [18–22].

Новые задачи микротехнологий связаны с наиболее характерными отличиями изделий микроэлектроники от изделий микромеханики: если первые по существу двумерны и механически статичны, то микромеханические объекты — это реальные трехмерные структуры, элементы которых должны иметь возможность относительного механического перемещения.

Наконец, необходимо освоение и использование *новых материалов*, применение которых, в свою очередь, потребует как разработки новых технологических приемов для их обработки, так и решения измерительных и материаловедческих задач по определению свойств и параметров этих материалов в микроразмерах.

Не менее важной и трудной для решения является проблема научно-технических связей между специалистами из различных областей знаний, обусловленная междисциплинарностью микро-системной техники [4, 23].

Основные положения упомянутых выше технологий и примеры их реализаций авторы изложат в последующих частях.

Список литературы

1. Tribology Issues and Opportunities in MEMS // Proceedings of NSF/AFOSR/ASME. Work Shop on Tribology Issues and Opportunities in MEMS, Columbus, Ohio, 9–

- 11.11.97 / Edited by B. Bhushan. Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands, 1998.

2. Плескачевский Ю. М. Перспективы применения новых материалов в электротехнической промышленности // Проблемы современного материаловедения. Труды IV сессии Научного совета по новым материалам МААН, 6.07.99, Киев, 1999. С. 46–52.

3. Лопота В. А., Юревич Е. И. Мехатроника — основа интеллектуальной техники будущего // Мехатроника, автоматизация, управление. 2002. № 7. С. 1–48.

4. Шалобаев Е. В. Микросистемная техника и мехатроника: особенности соотношения микро- и макроуровней // Микросистемная техника. 2000. № 4. С. 5–9.

5. Шалобаев Е. В. К вопросу о международном трансляторе по мехатронике // Мехатроника. 2002. № 2. С. 13–16.

6. Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 3. С. 6.

7. Шалобаев Е. В. Теоретические и практические проблемы мехатроники // Современные технологии / Под ред. С. А. Козлова, СПб.: Изд. ИТМО, 2001. С. 37–46.

8. Stadler F. A. Spitzenleistungen in der Klassischen Mikrobearbeitung — eine Frage der Geisteshaltung // Tagungsband Micro-Engineering 96, Stuttgart, 1996.

9. Hagemann B. Entwicklung von Permanentmagnet-Mikromotoren mit Luftspaltwicklung. Theses, University of Hannover, Germany, 1999.

10. Корляков А. М., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Микроэлектромеханическая структура на основе композиции "карбид кремния — нитрид алюминия" // Микроэлектроника. 1999. № 3. С. 201–212.

11. Шалобаев Е. В. Проблемы микро-системной техники и XXI век // Микросистемная техника. 2001. № 3. С. 37–38.

12. Дедков Г. В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели // Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 6. С. 585–618.

13. Плескачевский Ю. М., Шилько С. В., Стельмах С. В. Этапы развития и уровни организации структуры материалов: адаптивные композиты // Докла-

- ды Нац. Акад. наук Беларуси. 1999. Т. 43. № 5. С. 119–123.

14. Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. М.: Машиностроение, 1999.

15. Вейко В. П., Дышлошенко С. С. Лазерное микроструктурирование поверхностей // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). 2001. № 4. С. 119–129.

16. Legler J. Leistungsverhalten von Hochubersetzenden Strimradgetrieben und Raderketten der Geratetechnik, Theses, TU Dresden, 1989.

17. Thürigen C., Ehrfeld W., Hagemann B., Lehr H., Michel F. Development, Fabrication and Testing of a Multi-Stage Micro Gear System // Tribology Issues and Opportunities in MEMS. Kluwer Academic Publishers, 1998. P.397–402.

18. Tribology. Issues and Opportunities in MEMS // Proceedings of NSF/AFOSR/ASME. Work Shop on Tribology Issues and Opportunities in MEMS, Columbus, Ohio, 9–11.11.97 / Edited by B. Bhushan. Shiver Academic Publishers, Printed in the Netherlands, 1998.

19. Распопов В. Я. Микромеханические приборы. Тула: Изд-во ТулГУ, 2002. 256 с.

20. Шилько С. В., Старжинский В. Е. Разработка технологии изготовления зубчатых колес для микроэлектромеханических систем // Современные информационные технологии. Проблемы исследования, проектирования и производства зубчатых передач. Ижевск: Изд. ИжГТУ, 2001.

21. Шилько С. В. Технология изготовления зубчатых колес и передач для микроэлектромеханических систем // Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач. / Под общ. ред. В. Е. Старжинского и М. М. Кане. Минск — Гомель — СПб.: Технопринт, 2003. С. 303–323.

22. Oleksiuk W. The Role of Toothed Gears in mechatronic Devices // Gearing and Transmissions. 2001. N 1. P. 44–57.

23. Лучинин В. В., Таиров Ю. М. К вопросу об организации подготовки инженерных кадров по специальности "Микросистемная техника" // Микросистемная техника. 2000. № 2. С. 3–10.

УДК 621.38

О. Л. Балышева, канд. техн. наук,
Ю. Г. Смирнов, канд. техн. наук,
Л. П. Коновалова,
Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборостроения

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-СПРАВОЧНОЙ СИСТЕМЫ КОМПОНЕНТОВ НА ПАВ

Представлены результаты работы по созданию информационно-справочной системы компонентов на ПАВ, ядром которой является база данных. Проект создания базы данных одобрен Российским фондом фундаментальных исследований и выполняется при его финансовой поддержке. В базе содержится информация о литературе, параметрах пьезоэлектрических материалов для устройств на ПАВ, математических моделях, характеристиках фильтров на ПАВ, организациях и фирмах, включая зарубежные, специализирующихся в области устройств на ПАВ.

На сегодняшний день акустоэлектроника является одним из активно развивающихся направлений функциональной электроники. Среди акустоэлектронных устройств широкое распространение получили устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Такие преимущества как высокая надежность, малые масса и размеры, отсутствие энергопотребления, возможность выполнения различных операций обработки сигналов, реализация заданных технических характеристик с высокой точностью обеспечивают широкое применение и массовую потребность в этих устройствах, и прежде всего, рынком современных коммерческих средств связи [1].

Носителем информации в устройствах на ПАВ являются волны, у которых энергия упругих колебаний сосредоточена в тонком приповерхностном слое твердого тела. В качестве среды распространения используются пьезоэлектрические монокристаллы. Для преобразования электрических сигналов в акустические и обратно, а также для отражения и изменения траектории распространения акустических волн используются металлические многоэлементные структуры, нанесенные на поверхность пьезоэлектрической подложки. Возбуждение и прием акустических волн осуществляются с помощью входного и выходного преобразователей ПАВ, число электродов которых может быть различным (от единиц до нескольких тысяч).

Внешний вид устройства на ПАВ с одним встречно-штыревым преобразователем (ВШП) изображен на рис. 1. Отражательные структуры (ОС)

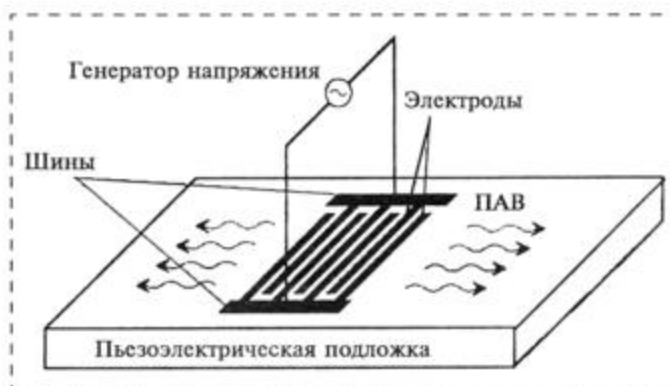


Рис. 1. Устройство на ПАВ

ПАВ чаще представляют собой решетки металлических короткозамкнутых или разомкнутых электродов или систему вытравленных в подложке канавок. Доступность акустических волн на всем пути от входного до выходного преобразователя, способность отражаться от неоднородностей поверхности и взаимодействовать с электрическими и акустическими полями обеспечивает возможность построения различных устройств обработки сигналов.

Характеристики устройств на ПАВ определяются свойствами материала подложки и его топологией, т. е. типом, количеством, взаимным расположением и геометрическими размерами преобразователей и отражателей ПАВ.

Топология устройства зависит не только от выполняемой операции обработки сигнала, но и от требуемых технических характеристик. Число различных вариантов топологий современных устройств на ПАВ исчисляется сотнями.

На рис. 2 изображены топологии двух типов фильтров на ПАВ. Первый фильтр (рис. 2, а) состоит из входного и выходного ВШП и многополоскового ответвителя (МПО). Фильтры такой конструкции обеспечивают хорошее подавление объемных волн и широко применяются в телевизионных системах [2]. Второй фильтр (рис. 2, б) с так называемой z-структурой (траекторией распространения ПАВ) состоит из двух ВШП и четырех ОС, обеспечивающих наклонное и нормальное отражение акустической волны. Фильтры такой конструкции позволяют получить высокую степень прямоугольности частотных характеристик и обеспечить высокую селективность, их успешно применяют в качестве фильтров промежуточных частот современных миниатюрных мобильных телефонов [2, 3].

Процесс изготовления ПАВ-устройств довольно сложен и требует значительных материальных затрат, поэтому возрастает роль начальных этапов разработки, не связанных с технологическим процессом. Расчет топологии ПАВ-устройств, матема-

тическое моделирование и предварительная оценка технических характеристик требуют изучения сложных процессов возбуждения, распространения, отражения и приема акустических волн в твердых телах. Проектирование устройств основано на теории сигналов и радиотехнических цепей и теории поля [1, 4].

К настоящему времени объем информации, связанный с техникой ПАВ, огромен. Как и в любой другой области научных знаний, наличие большого объема информации приводит к необходимости определенной организации и систематизации данных. Актуальной в настоящее время является задача разработки информационно-справочной системы по ПАВ-компонентам. Ядром этой системы должна стать база данных (БД), содержащая информацию, необходимую в процессе исследования и разработки ПАВ-компонентов. Проект создания БД по фильтрам на ПАВ одобрен Российским фондом фундаментальных исследований и выполняется при его финансовой поддержке. Предполагается, что основными пользователями этой системы должны стать разработчики устройств на ПАВ, ученые, специалисты, аспиранты и студенты, специализирующиеся в данной области.

Авторами статьи выделена предметная область, отражаемая БД, определены набор и тип хранимых данных, вид запросов БД и разработана структура БД (рис. 3).

На данном этапе БД содержит информацию о научно-технической литературе по проблемам ПАВ, параметрах материалов для ПАВ-устройств, математических моделях, параметрах фильтров на



Рис. 3. Структура организации данных в разрабатываемой БД

ПАВ, а также организациях и фирмах, связанных с техникой ПАВ.

Основываясь на собственном опыте и опыте своих коллег, авторы считают, что основным элементом разрабатываемой информационной системы должна быть тематически подобранная библиография. Именно поиск необходимой информации в литературе и работа с ней занимают основное время первых этапов научных исследований и разработок. Учитывая очень большое количество литературы по вопросам, связанным с разработкой ПАВ-устройств, авторы пока остановились на подборе литературы по проектированию фильтров на ПАВ как основного класса ПАВ-устройств. В таблице БД по литературе систематизированы выходные данные монографий, книг, справочников, научно-технических статей и других публикаций по устройствам на ПАВ. Даны краткие аннотации важнейших публикаций. В табл. 1 приведена выборка из таблицы БД по литературе.

Так как функционирование ПАВ-компонентов основано на распространении акустических волн в пьезоэлектрических материалах, то выбор материала подложки является одним из важнейших этапов разработки. Характеристики распространения ПАВ в материале определяют многие технические характеристики всего устройства. В настоящее время выбор кристаллов и различных срезов для ПАВ-устройств достаточно широк. Наряду с хорошо изученными и чаще всего используемыми материалами, такими как кварц, ниобат лития, танталат лития, применяют и относительно новые, до конца не исследованные материалы, например, лангасит, лангата, ланганит [5, 6]. Определенную трудность для разработчиков представляет отсутствие систематизированных данных, а иногда и любых данных о характеристиках применяемых для ПАВ-устройств современных материалов. Важнейшими характеристиками материалов с точки зрения использования в технике ПАВ являются фазовая скорость ПАВ, коэффициент электромеханической связи, температурный коэффициент задержки (ТКЗ). Например, нулевым ТКЗ обладает кварц

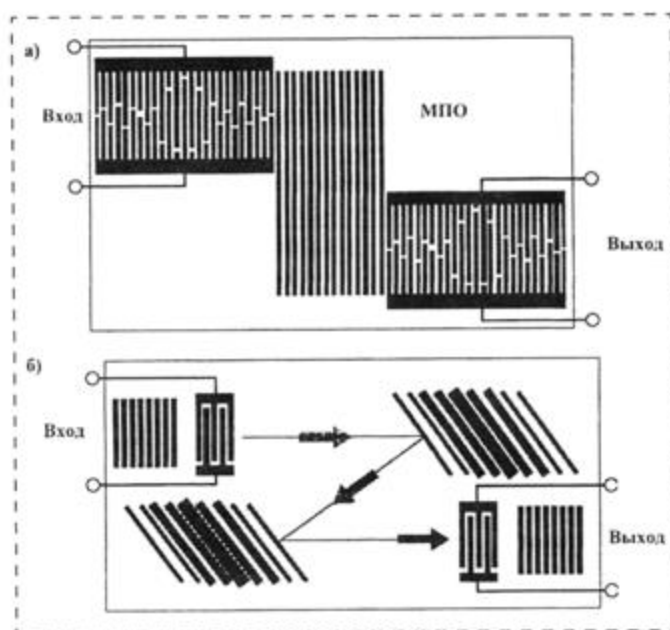


Рис. 2. Топологии фильтров на ПАВ

Литература

Код	Название	Авторы	Изд-во	Год	Стр.	Кол. стр.	Назв. журнала	№ журнала	Том
4	Фильтры на поверхностных акустических волнах	В.С. Орлов, В.С. Бондаренко	Радио и связь Мир	1984		272			
5	Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: Материалы, технология, конструкция, применение	И. Зеленка		1990		584			
9	Акустоэлектронные радиокомпоненты: элементы и устройства на поверхностных акустических волнах	В.И. Речицкий	Сов. радио	1980		264			
20	Дисперсионные линии задержки на поверхностных акустических волнах с фазовым взвешиванием	В.И. Григорьевский, Е.Ю. Жданов, А.И. Крикунов		1993	1710—1716		Радиотехника и электроника	9	38
152	High performance SAW convolvers used in high bit rate and wideband spread spectrum CDMA communication systems	Hikita M., Takubo C., Asai K.		2000	233—241		IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.	1	47
153	A robust ultra-broad-band wireless communication system using SAW chirped delay lines	Sprinder A., Huemer M., Reindl L., Ruppel C.C.W., Pohl A., Seifert F., Gugler W., Weigel R.		1998	2213—2219		IEEE Trans. Microwave Theory Tech.	12	46
159	Measurements of LGS, LGN, and LGT Thermal Coefficients of Expansion and Density	Malocha D. C., Francois-Saint-Cyr, Richardson K., Helmbold		2002	350—355		IEEE Transactions on UFFC	3	49

st-среза и его выбор в качестве подложки обеспечивает требования к температурной стабильности. Однако малое значение коэффициента электромеханической связи не позволяет реализовать на подложках из кварца широкополосные устройства (более 10 %) с низкими потерями. Второй широко распространенный материал для ПАВ-устройств — ниобат лития, обладающий худшей температурной стабильностью и имея больший коэффициент электромеханической связи, успешно применяется для широкополосных устройств с малыми потерями, где нет строгих требований по температурной ста-

бильности. Приведенный пример наглядно показывает, что систематизированные данные о параметрах кристаллов и их различных срезов не только предоставляют разработчику предварительную информацию о возможности их использования в различных устройствах, но и в дальнейшем позволяют рассчитать топологию и оценить технические характеристики проектируемого устройства. В табл. 2 приведена выборка из таблицы БД по параметрам материалов. Всего в таблице содержатся данные о параметрах более 70 различных материалов и их срезов.

Таблица 2

Параметры пьезоэлектрических материалов для устройств на ПАВ

Параметры пьезоматериала	Ниобат лития	Кварц	Лангасит	Лангитат
Химическая формула	LiNbO ₃	SiO ₂	La ₃ Ga ₅ SiO ₁₄	La ₃ Ga _{5,5} Nb _{0,5} O ₁₄
Ориентация	YZ	ST, X (ST—X)		
Углы Эйлера $\theta_1; \theta_2; \theta_3, ^\circ$	0; 90; 90	0; 132,75; 0	90; 40; -6	0; 20; 86
Фазовая скорость ПАВ на свободной поверхности, м/с	3488	3157,6	2535	2775
Параметр $\Delta v/v, \%$	2,41	0,06		
Коэффициент электромеханической связи, $k^2, \%$	4,5 (4,8; 5,04)	0,16	0,44	0,32
Температурный коэффициент задержки (ТКЗ), $10^{-6} \cdot 1/^\circ\text{C}$	+94 (+92)	0	-19 (ppm/c)	-1,1 (ppm/c)
Температурный коэффициент скорости (ТКС), $10^{-6} \cdot 1/^\circ\text{C}$	-87	-34 (14)		
Коэффициент поглощения ПАВ $\alpha, (af + \beta f^2)$	0,88	2,62		
Коэффициент поглощения ПАВ $\beta, (af + \beta f^2)$	0,19	0,47		
Параметр анизотропии	-1,08	0,378		
Угол отклонения потока энергии от направления распространения, $\psi, ^\circ$	0	0	0	19,1
Эффективная (относительная) диэлектрическая проницаемость	50,2	4,55		
Емкость пары электродов, пФ/м	464	50		
Плотность материала, 10^3 кг/м^3	4,628		5,743	5,908
Источник данных	[4, 7, 8]	[4, 7, 8]	[5, 6]	[5, 6]

Организации и фирмы, специализирующиеся в области устройств на ПАВ

Фирма	Страна	Почтовый адрес	E-mail	Web-сайт	Телефон	Факс	Иссл.	Изг.
Vectron International	USA	267 Lowell Road, Hudson, NH 03051	vectron@vec- tron.com	www.vectron.com	1-88-vectron-1, 1-888-328-7661	1-888-fax-vec- tron	—	+
Temex Micro- sonics (SAW Activities) ООО "БУТИС-М"	USA	P.O. BOX 540NJ-07511 TOTOWA	heines@tctus.com	www.temex-tmx.com	(1) 860 872 23 93	(1) 860 872 67 74	+	+
	Россия	123060, Москва, Волоколамский пр., д. 10	Butis.M@ru.net	www.butis-m.ru	(095) 196-8280, (095) 941-9351	(095) 196-8280	—	+
Омский НИИ приборостро- ения	Россия	644009, Омск, ул. Масленни- кова, 231	info@pribor.omsk.ru postmaster@pri- bor.omsk.ru	www.oniip.omsk.ru	(3812) 33-3674 (3812) 39-9358	(3812) 39-9391	+	—

Данные о научных центрах, организациях и фирмах, специализирующихся в области исследования, разработки, изготовления или применения ПАВ-устройств позволяют получить доступ к информации, предоставляемой этими организациями и фирмами, установить научное сотрудничество и обмен полезной информацией и специалистами. Это, в свою очередь, помогает оценить мировой уровень современных разработок, определить актуальные направления исследований. В табл. 3 представлены данные о четырех фирмах, специализирующихся в области разработки и изготовления компонентов ПАВ. Всего в базе на настоящее время есть данные о 60 российских и зарубежных организациях и фирмах.

В табл. 4 представлены характеристики трех типов фильтров, применяемых в системах мобильной связи стандарта GSM, производимых фирмой Vectron International. Приведенные в табл. 4 данные доступны по адресу www.vectron.com. Кроме того, в Интернете по каждому из этих фильтров можно получить дополнительную информацию (внешний вид, чертеж фильтра, выводы, стоимость и т. д.).

Очень важным этапом проектирования современных устройств на ПАВ является математическое моделирование. С помощью компьютерных программ не только рассчитывается топология устройств, но и выполняется предварительный расчет их технических характеристик до этапа создания опытных образцов. В зависимости от решаемой задачи и возможностей разработчик может применять различные как по вычислительной сложности,

так и по числу учитываемых факторов модели. Важно отметить, что число применяемых моделей и их модификаций постоянно растет. Представляет интерес обзорная информация по существующим математическим моделям. Такая информация позволяет получить сравнительные характеристики разных моделей и в зависимости от решаемой задачи выбрать существующую или разработать необходимую модель. Таблица по математическим моделям в настоящее время заполняется авторами.

Разрабатываемая БД может быть дополнена как новыми записями существующих таблиц, так и новыми таблицами и связями между ними. Планируется осуществлять обновление информации в базе. На первом этапе БД реализована в СУБД MS Access 2000, как одном из наиболее простых и доступных средств организации БД [9].

В дальнейшем предполагается дополнить существующую БД программами моделирования и расчета компонентов ПАВ и другой информацией, образующей информационно-справочную систему.

Список литературы

1. Ruppel C. C., Reinld L., Weigel R. SAW Devices and Their Wireless Communication Applications // IEEE Microwave Magazine. June 2002. P. 65—71.
2. Ruppel C. C. W., Dill R., Fischerauer A., Fischerauer G., Gawlik W., Machui J., Muller F., Reindl L., Ruile W., Scholl G., Schropp I., and Wagner K. C. SAW Devices for Consumer Communication Applications // IEEE Transactions on UFFC. September 1993. Vol. 40. No. 5. P. 438—453.
3. Freisleben S., Bergmann A., Gerster J., Bauernschmitt U., and Ruppel C. C. W. High Selectivity IF SAW Filters for CDMA Mobile Phones. Ultrasonics Symp. Proc. 2000.
4. Фильтры на поверхностных акустических волнах. Расчет, технология и применение / Под ред. Г. Мэттьюза. М: Радио и связь, 1981. 472 с.
5. Naumenko N., Solie L. Optimal Cuts of Languisite, $\text{La}_2\text{Ga}_2\text{SiO}_4$ for SAW Devices // IEEE Transactions on UFFC. 2001. Vol. 48. No. 2. P. 530—537.
6. Malocha D. C., Francois-Saint-Cyr H., Richardson K., Helmbold R. Measurements of LGS, LGN, and LGT Thermal Coefficients of Expansion and Density // IEEE Transactions on UFFC. 2002. Vol. 49. No. 3. P. 350—355.
7. Кондратьев С. Н., Петрижик Е. А. Материалы для устройств на поверхностных и приповерхностных акустических волнах // Зарубежная радиоэлектроника. 1986. № 1. С. 31—41.
8. Слободник А. Поверхностные акустические волны и материалы для устройств на поверхностных акустических волнах // ТИИЭР. 1976. Т. 64. № 5.
9. Робинсон С. Microsoft Access 2000. СПб: Питер, 2000.

Таблица 4

Характеристики ПАВ фильтров, выпускаемых фирмой Vectron International

Номер партии	Центральная частота, МГц	Полоса пропускания, МГц	Вносимые потери, дБ	Предельное подавление	Тип корпуса
TFS125	125	0,300	3,50	30	BV05
TFS199D	199	0,200	8,00	30	BV28
TFS341B	341	0,400	8,50	40	BV16

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 531.787.084.2

К. А. Валиев, акад. РАН,
В. А. Кальнов, канд. техн. наук,
А. П. Кирьянов, канд. физ.-мат. наук,
Физико-технологический институт РАН,
г. Москва
П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф.
МИРЭА, г. Москва

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДВИЖНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрены варианты моделирования подвижных дифракционных решеток, использованных в качестве чувствительного элемента микромеханического акселерометра. Результаты моделирования показывают выраженную зависимость параметров дифракционной картины (интенсивность главного дифракционного максимума для выбранных углов дифракции) от значения зазора между подвижной и неподвижной решетками.

Введение

Необходимость в управлении различными технологическими процессами в экстремальных условиях, например, в условиях невесомости на космических аппаратах и орбитальных станциях или при использовании роботов в чрезвычайных ситуациях делает весьма актуальной проблему точного измерения и учета в исполнительных действиях микроускорений в реальном масштабе времени контролируемых процессов.

Продоланный нами ранее анализ [1] возможностей использования оптической интерферометрии на основе дифракционных оптических решеток для создания чувствительных датчиков механического ускорения показал принципиальную реализуемость представленной выше научно-технической проблемы создания высокочувствительных интегральных акселерометров. В данной работе нами приведены результаты моделирования подвижных дифракционных решеток, которые могут составить основу построения интегральных акселерометров.

Модель расчета

В выборе математической модели расчета дифракционной картины в системе интегрального акселерометра на основе подвижных дифракционных решеток мы исходили из основных результатов

Фурье-оптики [2]. Проблема разработки математических моделей функционирования интегральных дифракционных решеток и отладки методики сопоставления результатов моделирования и реальных экспериментов занимает определенное внимание исследователей [3]. В научной литературе рассмотрены также возможности применения техники матриц Джонса [4] к оптическим интегральным устройствам [5].

Согласно основным результативным положениям Фурье-оптики [2] любая периодическая пространственная структура может быть представлена как линейная суперпозиция гармонических синусоидальных решеток, которые взаимодействуют с падающим на них плоским потоком излучения как пропускающий фильтр — транспарант, амплитудный коэффициент пропускания которого $\tau(x; \Lambda)$ в плоскости размещения транспаранта с пространственным периодом Λ описывается соотношением вида:

$$\tau(x; \Lambda) = 1 + \alpha \sin(2\pi x/\Lambda), \quad (1)$$

где параметр модуляции $\alpha \ll 1$.

Такая пропускающая синусоидальная дифракционная решетка расщепляет падающий на нее плоский поток световой волны на три плоских световых пучка, распространяющихся под углами дифракции $\theta_{\text{дифр}}$ относительно направления θ_0 падающего на решетку потока волн, которые соответствуют условию фазового согласования волн. Это условие принимает соответственно вид [2]:

$$\Lambda(\sin\theta_{\text{дифр}} - \sin\theta_0) = 0, \quad +\lambda \quad \text{и} \quad -\lambda. \quad (2)$$

Суперпозиция всех световых пучков, дифрагированных на пропускающих синусоидальных дифракционных решетках, позволяет представить реальную дифракционную решетку с известным столбчатным профилем пропускания как соответственный ряд Фурье по пространственным гармоникам Λ , задающих синусоидальную дифракционную решетку с коэффициентом пропускания (1). Это обстоятельство позволяет применить метод плоских волн [2, 6], генерируемых соответственными дифракционными решетками с необходимым при этом учетом реального фазового запаздывания посылаемых ими плоских пучков световых волн и возникающего естественно на их пути амплитудного ослабления волн. Идеальный Фурье-отклик для всей оптической системы в целом может быть получен, если изображение источника света, облучающего дифракционную решетку, фокусируется

на фотоприемнике [2]. Это, в частности, обеспечивается размещением фотоприемников в фокальной плоскости линз, в которой и получается дифракционная картина Фраунгофера [2, 6] как дифракционная картина в дальней волновой зоне. Наконец улучшение информационной способности интерферометрической системы на основе дифракционных решеток обеспечивается, в свою очередь, освещением достаточно широкой области дифракционной решетки с помощью расширения оптической системой светового пучка, освещающего рабочую область дифракционной решетки.

Нами рассмотрена дифракционная оптическая система (рис. 1), ориентированная на создание сверхчувствительного интегрального акселерометра и состоящая соответственно из двух параллельных друг другу плоских дифракционных решеток. Одна из них — подвижная — может закономерно смещаться относительно другой на некоторое расстояние Z_0 вдоль оси Z по ходу потока лазерного излучения с длиной волны λ , падающего нормально на входную решетку, первую на пути потока волн. Параметры обеих дифракционных решеток: d_0, d_1 — периоды входной неподвижной и выходной подвижной решеток соответственно; a_0, a_1 — ширина щелей для этих решеток; N_0, N_1 — число щелей для них; $u = \sin \theta_0$ — параметр дифракции потока света на входной щели; θ_1 — угол дифракции на второй подвижной дифракционной решетке; Z_0 — расстояние между входной и выходной решетками вдоль оси Z , нормальной плоскости решеток; I_0 — интенсивность и λ — длина волны падающего на решетки потока света.

Расчет полного коэффициента пропускания $T(\theta_1; \lambda; d_1; Z_0)$ светового потока проведен методом численного интегрирования в зависимости от угла дифракции θ_1 на второй подвижной выходной решетке. В расчете приняты следующие обозначения: λ — длина волны излучения; d_1 — период выходной подвижной дифракционной решетки; Z_0 — расстояние между входной и выходной решетками;

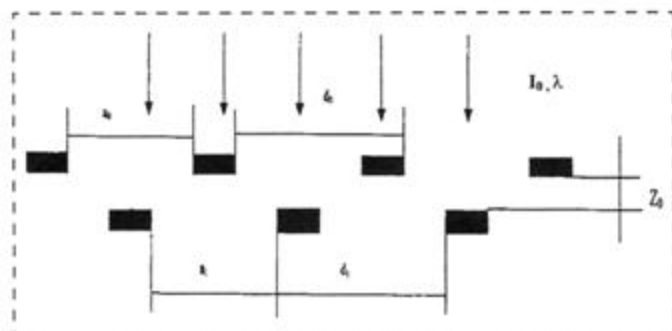


Рис. 1. Схема дифракционной оптической системы

X_{01} — смещение второй дифракционной решетки относительно первой в плоскости решеток. Коэффициент пропускания $T(\theta_1; \lambda; d_1; Z_0)$ определяется отношением интенсивности пучка светового излучения $I(\theta_1; \lambda)$, дифрагированного под углом θ_1 на второй подвижной решетке, к интенсивности $I_0(\lambda)$ светового потока, падающего нормально на входную неподвижную решетку. Полный коэффициент пропускания $T(\theta_1; \lambda; d_1; Z_0)$ для рассматриваемой оптической системы дифракционных решеток, представляется как произведение характерных множителей, называемых щелевым T_{1s} и решеточным T_{1g} множителями для выходной решетки и интерференционного множителя F^2 , представленного суммой так называемых косинусного F_c^2 и синусного F_s^2 слагаемых:

$$T = (a_1 a_0 / \pi)^2 T_{1s} T_{1g} F^2 = (a_1 a_0 / \pi)^2 T_{1s} T_{1g} (F_c^2 + F_s^2), \quad (3)$$

где

$$T_{1s} = [\sin(\pi a_1 \sin \theta_1 / \lambda) / \pi a_1 \sin \theta_1 / \lambda]^2; \quad (4)$$

$$T_{1g} = [\sin(\pi N_1 d_1 \sin \theta_1 / \lambda) / \sin(\pi d_1 \sin \theta_1 / \lambda)]^2; \quad (5)$$

$$F_c = \int_0^1 \tau_{os} \tau_{og} \tau_{1g} (\cos au) \cos[(\pi Z_0 / \lambda)(1 - u^2)^{1/2}] du, \quad (6)$$

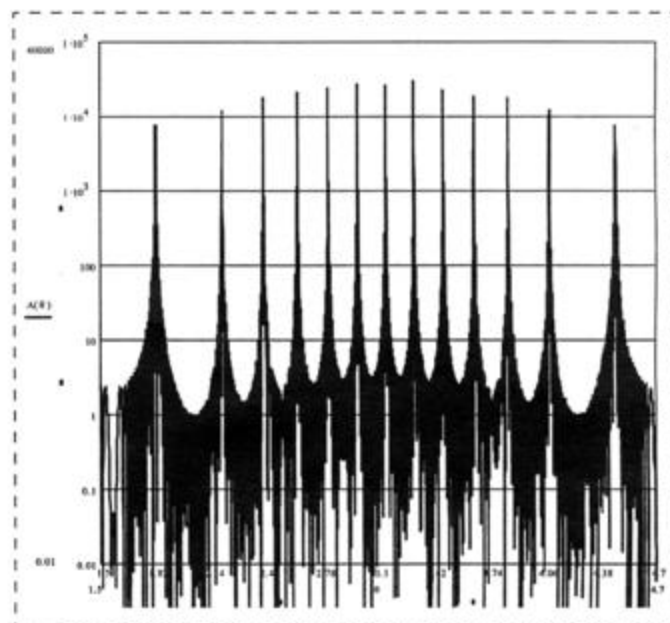


Рис. 2. Изменение интенсивности проходящего света от угла наблюдения θ

$$F_s = \int_0^1 \tau_{os} \tau_{og} \tau_{lg} (\sin \alpha u) \times \cos[(\pi Z_0 / \lambda)(1 - u^2)^{1/2}] du. \quad (7)$$

При этом так называемые амплитудный щелевой τ_{os} и решеточный τ_{og} множители для входной решетки можно получить, заменив параметры выходной решетки — ширину щели a_1 и период d_1 — параметрами входной решетки a_0 и d_0 , а так называемый амплитудный решетчатый множитель τ_{lg} на выходной решетке определяется множителем T_{lg} выходной решетки на мощности, так что соответственно имеем:

$$\tau_{os} = [\sin(\pi a_0 u / \lambda) / (\pi a_0 u / \lambda)]; \quad (8)$$

$$\tau_{og} = [\sin(\pi N_0 d_0 u / \lambda) / \sin(\pi d_0 u / \lambda)]; \quad (9)$$

$$\tau_{lg} = (T_{lg})^{1/2} = [\sin(\pi N_1 d_1 u / \lambda) / \sin(\pi d_1 u / \lambda)], \quad (10)$$

$$\text{где } u = \sin \theta; \quad (11)$$

$$\alpha = (\pi / \lambda) [(N_0 - 1) d_0 + a_0 + (N_1 - 1) d_1 + \pi / \lambda X_{01}]. \quad (12)$$

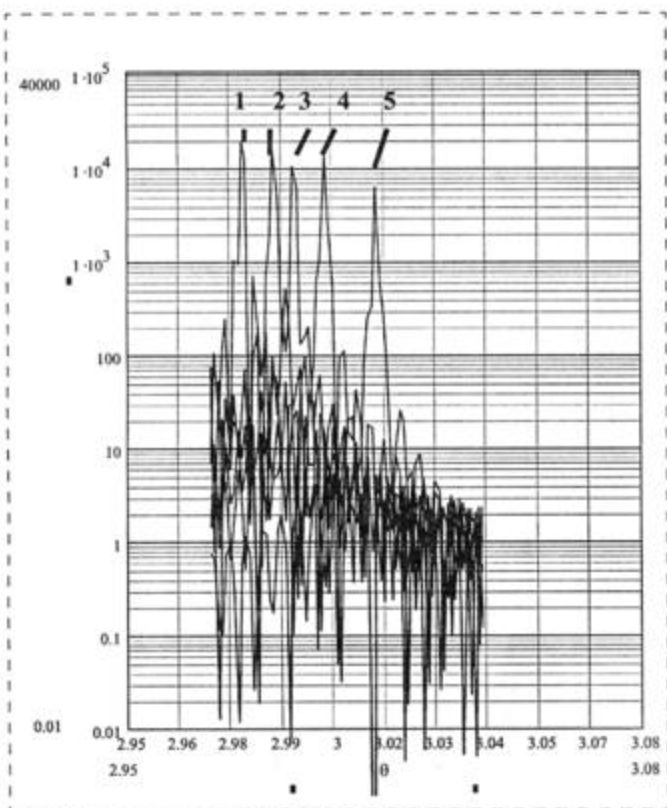


Рис. 3. Изменение интенсивности проходящего света для разных длин волн:
1 — $\lambda = 0,63$; 2 — $\lambda = 0,6$;
3 — $\lambda = 0,58$; 4 — $\lambda = 0,55$;
5 — $\lambda = 0,5$

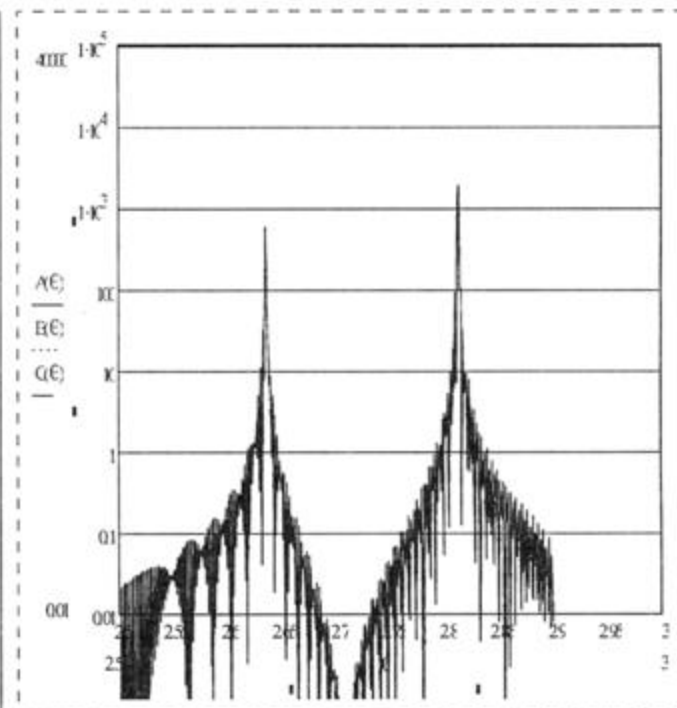


Рис. 4. Спектральная характеристика для разных значений X_{01} :
1 — $X_{01} = 0,1$; 2 — $X_{01} = 1$; 3 — $X_{01} = 2$ мкм

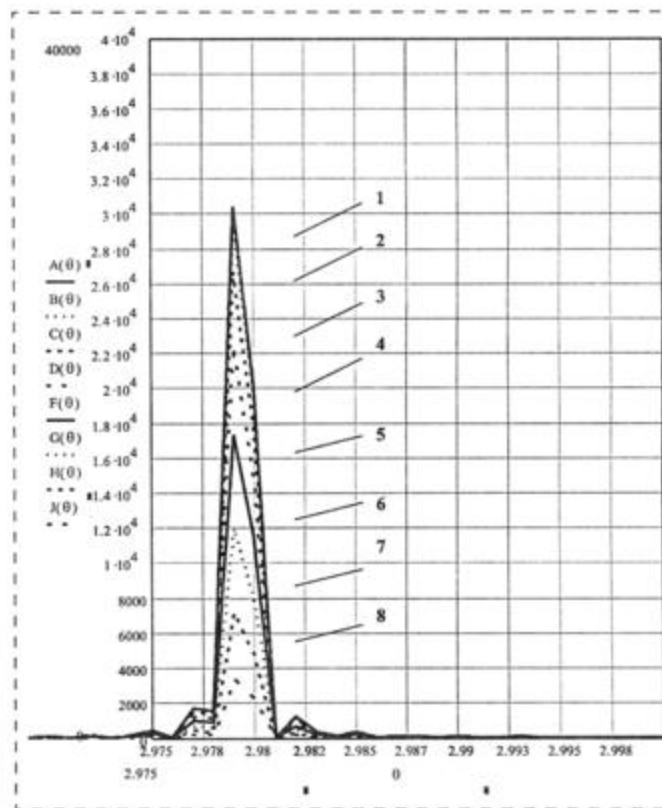


Рис. 5. Зависимость интенсивности проходящего света от угла наблюдения θ для разных значений зазора Z_0 между дифракционными решетками:
1 — $Z_0 = 0,01$ мкм; 2 — $Z_0 = 0,05$; 3 — $Z_0 = 0,1$; 4 — $Z_0 = 0,15$;
5 — $Z_0 = 0,2$; 6 — $Z_0 = 0,25$; 7 — $Z_0 = 0,3$; 8 — $Z_0 = 0,35$

Результаты

Результаты численных расчетов коэффициентов пропускания $T(\theta_1; \lambda; d_1; Z_0)$ при соответствующих численных значениях используемых в задаче параметров с указанием параметра, принятого при этом в качестве аргумента, представлены последовательно на рис. 2–5. На каждом из них приведены значения соответствующих параметров, используемых в данном конкретном расчете дифракционной картины на системе двух дифракционных решеток. Так, на рис. 2 представлены изменения интенсивности проходящего света от угла наблюдения θ при параметрах $\theta_1 = 1,5 \dots 4,7^\circ$; $d_0, d_1 = 3,9$; $Z_0 = 0,1$; $N_0, N_1 = 100$; $X_{01} = 0,1$; на рис. 3 — изменение интенсивности проходящего света для разных длин волн λ ; на рис. 4 — спектральная характеристика для разных значений $X_{01} = 0,1; 1,0; 2,0$ мкм.

Особенно интересны результаты расчета зависимости интенсивности проходящего светового потока от угла наблюдения θ для разных значений расстояния Z_0 между входной и выходной дифракционными решетками, представленные на рис. 5.

Результаты расчета со всей определенностью указывают на четко выраженную зависимость параметров дифракционной картины (изменение интенсивности главного дифракционного максимума для выбранных углов дифракции θ_1) от зазора Z_0 между входной неподвижной и выходной подвижной дифракционными решетками, что может быть использовано для построения миниатюрного акселерометра.

Список литературы

1. Валиев К. А., Кальнов В. А., Кирьянов А. П., Малышев П. П. Оптическая интерферометрия в интегральной микромеханике // Микросистемная техника. 2003. № 9. С. 28–30.
2. Goodman J. W. Introduction to Fourier Optics. N.-Y.: Vc-Graw-Hill, 1996.
3. Bowler M. A., Finetti P., Holland D. M. P., Humphrey I., Quinn F. M., Roper M. D. // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. 2001. Vol. A 467–468. P. 317–320.
4. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. 581 с.
5. Belea A. The optical transfer matrix for plane diffraction gratings in Littrow mounting // J. Optics (Paris). 1992. Vol. 23. No. 1. P. 19–26.
6. Бори М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1972.

УДК 004.085

Ю. Н. Слесарев, канд. техн. наук,
Пензенский государственный университет

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛА ПРИ МАГНИТООПТИЧЕСКОМ ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ ИНФОРМАЦИИ

Проведен анализ искажений сигнала при воспроизведении термомагнитной записи информации при дестабилизирующих факторах. Исследованы методы формирования цифрового сигнала воспроизведения с учетом шумов в системе воспроизведения. Сделан вывод о лучшей пригодности для экстремального детектирования импульсных методов записи, основанный на полученном свойстве сигнала.

Одним из требований, предъявляемых к каналам воспроизведения информации, является точность восстановления записанной информации, представленной в виде изменения состояния намагниченности носителя, даже если она искажена при записи.

Для преобразования сигнала воспроизведения из двоичной записи в цифровой сигнал используются два основных способа [1]. Первый способ со-

стоит в использовании операции сравнения сигнала воспроизведения с пороговым уровнем. Второй способ незначительно использует амплитуду как фактор сигнала и обычно осуществляется в результате выполнения операций дифференцирования, усиления и сравнения с низким уровнем порогового напряжения. Возмущающими факторами при воспроизведении могут служить смещение светового пучка воспроизведения при вибрациях и ударах, неточности работы сервосистем накопителя.

Рассмотрим воспроизведение перепада намагниченности, записанного термомагнитным способом. Модель, принятая для анализа, изображена на рис. 1.

Для "положительного" перепада намагниченности и светового пучка радиусом 2σ с координатами x_0, y_0 , движущегося вдоль дорожки шириной $2a$ в направлении стрелки, получим выражение сигнала воспроизведения

$$i_d(y_0, x_0) = M_a g(\lambda) \frac{1}{2} \frac{P_i}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-a}^a \exp\left(-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right) h_0 \times \\ \times \left[1 - F\left(\frac{b - \sqrt{a^2 - y^2 - x_0^2}}{\sigma}\right) \right] dy, \quad (1)$$

Результаты

Результаты численных расчетов коэффициентов пропускания $T(\theta_1; \lambda; d_1; Z_0)$ при соответствующих численных значениях используемых в задаче параметров с указанием параметра, принятого при этом в качестве аргумента, представлены последовательно на рис. 2–5. На каждом из них приведены значения соответствующих параметров, используемых в данном конкретном расчете дифракционной картины на системе двух дифракционных решеток. Так, на рис. 2 представлены изменения интенсивности проходящего света от угла наблюдения θ при параметрах $\theta_1 = 1,5 \dots 4,7^\circ$; $d_0, d_1 = 3,9$; $Z_0 = 0,1$; $N_0, N_1 = 100$; $X_{01} = 0,1$; на рис. 3 — изменение интенсивности проходящего света для разных длин волн λ ; на рис. 4 — спектральная характеристика для разных значений $X_{01} = 0,1; 1,0; 2,0$ мкм.

Особенно интересны результаты расчета зависимости интенсивности проходящего светового потока от угла наблюдения θ для разных значений расстояния Z_0 между входной и выходной дифракционными решетками, представленные на рис. 5.

Результаты расчета со всей определенностью указывают на четко выраженную зависимость параметров дифракционной картины (изменение интенсивности главного дифракционного максимума для выбранных углов дифракции θ_1) от зазора Z_0 между входной неподвижной и выходной подвижной дифракционными решетками, что может быть использовано для построения миниатюрного акселерометра.

Список литературы

1. Валиев К. А., Кальнов В. А., Кирьянов А. П., Малышев П. П. Оптическая интерферометрия в интегральной микромеханике // Микросистемная техника. 2003. № 9. С. 28–30.
2. Goodman J. W. Introduction to Fourier Optics. N.-Y.: Vc-Graw-Hill, 1996.
3. Bowler M. A., Finetti P., Holland D. M. P., Humphrey I., Quinn F. M., Roper M. D. // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. 2001. Vol. A 467–468. P. 317–320.
4. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. 581 с.
5. Belea A. The optical transfer matrix for plane diffraction gratings in Littrow mounting // J. Optics (Paris). 1992. Vol. 23. No. 1. P. 19–26.
6. Бори М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1972.

УДК 004.085

Ю. Н. Слесарев, канд. техн. наук,
Пензенский государственный университет

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛА ПРИ МАГНИТООПТИЧЕСКОМ ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ ИНФОРМАЦИИ

Проведен анализ искажений сигнала при воспроизведении термомагнитной записи информации при дестабилизирующих факторах. Исследованы методы формирования цифрового сигнала воспроизведения с учетом шумов в системе воспроизведения. Сделан вывод о лучшей пригодности для экстремального детектирования импульсных методов записи, основанный на полученном свойстве сигнала.

Одним из требований, предъявляемых к каналам воспроизведения информации, является точность восстановления записанной информации, представленной в виде изменения состояния намагниченности носителя, даже если она искажена при записи.

Для преобразования сигнала воспроизведения из двоичной записи в цифровой сигнал используются два основных способа [1]. Первый способ со-

стоит в использовании операции сравнения сигнала воспроизведения с пороговым уровнем. Второй способ незначительно использует амплитуду как фактор сигнала и обычно осуществляется в результате выполнения операций дифференцирования, усиления и сравнения с низким уровнем порогового напряжения. Возмущающими факторами при воспроизведении могут служить смещение светового пучка воспроизведения при вибрациях и ударах, неточности работы сервосистем накопителя.

Рассмотрим воспроизведение перепада намагниченности, записанного термомагнитным способом. Модель, принятая для анализа, изображена на рис. 1.

Для "положительного" перепада намагниченности и светового пучка радиусом 2σ с координатами x_0, y_0 , движущегося вдоль дорожки шириной $2a$ в направлении стрелки, получим выражение сигнала воспроизведения

$$i_d(y_0, x_0) = M_a g(\lambda) \frac{1}{2} \frac{P_i}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-a}^a \exp\left(-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right) h_0 \times \\ \times \left[1 - F\left(\frac{b - \sqrt{a^2 - y^2 - x_0^2}}{\sigma}\right)\right] dy, \quad (1)$$

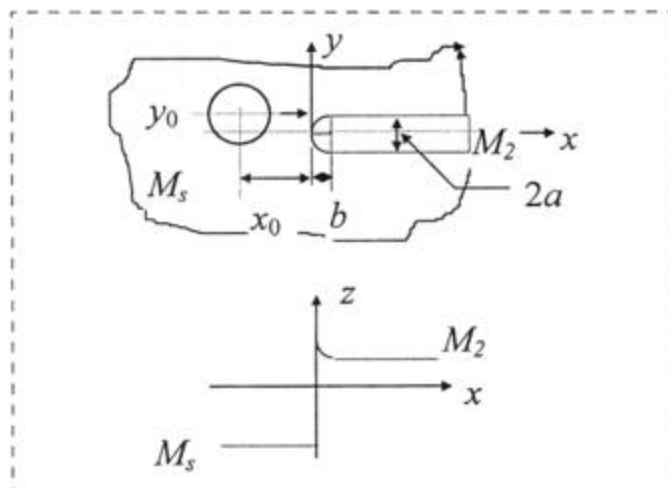


Рис. 1. Воспроизведение "положительного" перепада намагниченности

где M_a — коэффициент передачи усилителя; $g(\lambda)$ — спектральная чувствительность фотоприемника от длины волны λ излучения мощностью P_i ; h_0 — реакция канала воспроизведения на перепад намагниченности; $F(\cdot)$ — интеграл вероятности.

Выражение (1) исследовано при $h_0 = 1$ и множителе, находящемся перед знаком интеграла, равном единице. Результаты приведены на рис. 2.

Из рис. 2 можно сделать вывод об изменении амплитуды сигнала воспроизведения и положения его фронта от смещения y_0 пучка воспроизведения относительно центра дорожки.

Сигнал воспроизведения от следа записи любой формы можно представить в виде комбинации характеристических импульсов воспроизведения "положительных" и "отрицательных" перепадов намагниченности (рис. 3).

Из приведенного графика следует вывод об уменьшении амплитуды сигнала воспроизведения при смещении пучка воспроизведения относительно

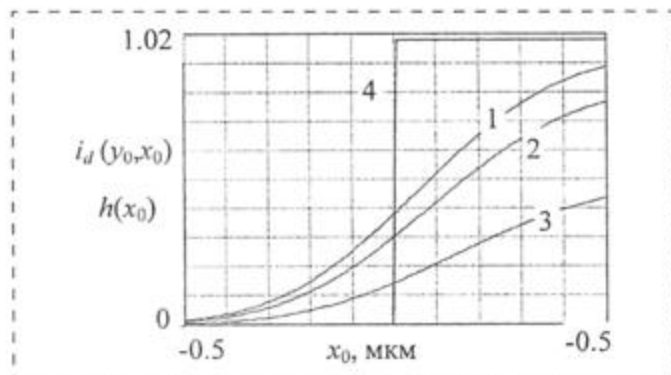


Рис. 2. Нормированное значение сигнала воспроизведения $i_d(y_0, x_0)$ от положения перепада намагниченности $h(x_0)$ при $a = 0,5$ мкм, $\sigma = 0,25$ мкм; кривые 1, 2, 3 соответствуют смещению y_0 пучка воспроизведения относительно дорожки записи на 0; 0,5a; 1a мкм; 4 — $h(x_0)$

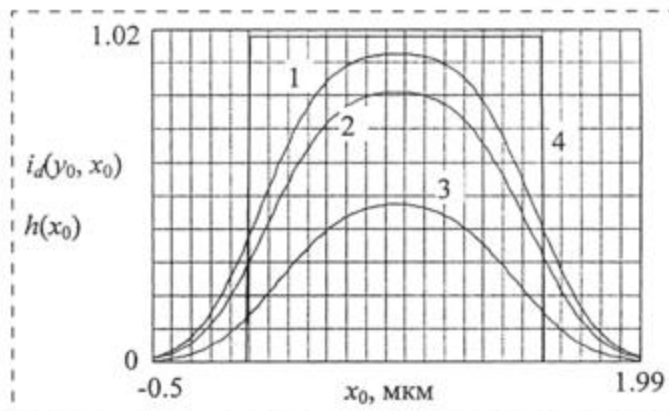


Рис. 3. Сигнал воспроизведения от двух перепадов намагниченности при $a = 0,5$ мкм, $\sigma = 0,25$ мкм; кривые 1, 2, 3 соответствуют смещению y_0 пучка воспроизведения относительно дорожки записи на 0; 0,5a; 1a мкм; кривая 4 — положению перепадов намагниченности $h(x_0)$

но центра дорожки записи. Кривые первых производных сигналов воспроизведения приведены на рис. 4.

Из рис. 3, 4 следует, что положение точек перегиба сигнала воспроизведения или максимальное значение первой производной сигнала воспроизведения не совпадает с моментом переключения носителя даже при нулевом смещении пучка воспроизведения относительно центра дорожки записи, а сдвигается в сторону переключенного материала как для "положительного", так и для "отрицательного" перепада намагниченности. Этот уход носит симметричный характер и увеличивается со смещением пучка воспроизведения. На кривой первой производной сигнала воспроизведения имеется точка f пересечения ее с нулевой линией. Эта координата соответствует середине расстояния между перепадами намагниченности и слабо зависит от смещения пучка воспроизведения.

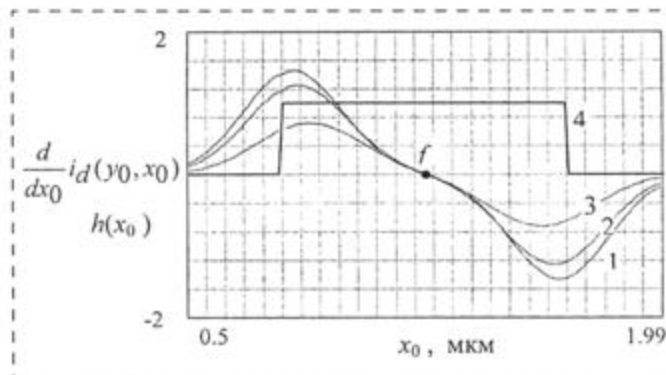


Рис. 4. Первая производная сигнала воспроизведения $i_d(y_0, x_0)$ от двух перепадов намагниченности $h(x_0)$ при $a = 0,5$ мкм, $\sigma = 0,25$ мкм и смещении y_0 , равном 0; 0,5a; 1a мкм (соответственно кривые 1, 2, 3); 4 — $h(x_0)$

Исследуем методы обработки сигнала воспроизведения при термомагнитной записи (ТМЗ) с учетом выявленных искажений информационных сигналов, свойственных каналу воспроизведения.

Воспроизведение потенциальной записи пороговым способом. Такое воспроизведение основано на сравнении сигнала воспроизведения с пороговым уровнем, при превышении или понижении которого формируется сигнал воспроизведения, указывающий на временное положение записанных переключений намагниченности. Достоинством метода является малый уровень собственных шумов, вносимых формирователем. Тогда, используя суперпозицию характеристических импульсов при воспроизведении произвольно заданных перепадов намагниченности, получим сигнал воспроизведения (рис. 5, кривая 2), для $2a = 1$ мкм, $\sigma = 0,25$ мкм, $y_0 = 0,25$ мкм.

Сформированный сигнал воспроизведения (рис. 5, кривая 3), содержащий изменения в момент равенства сигнала воспроизведения $i_d(x_0)$ и порогового уровня c , выбранного как полусумма огибающей максимальной и минимальной амплитуд сигнала воспроизведения, достаточно плохо соответствует записываемой последовательности $zap(x_0)$ даже при слабом межсимвольном взаимодействии. Данный метод формирования при рассмотренном способе выбора уровня дискриминации может быть использован при низких плотностях записи. В ошибку воспроизведения включаются все погрешности формирования следа записи информации, свойственные тепловому методу записи [2].

Экстремальное детектирование импульсных методов. Наличие операции дифференцирования приводит к увеличению уровня собственных шумов. Анализ метода формирования сложно сделать без их учета. Эквивалентная схема входной цепи линейного усилителя сигнала воспроизведения

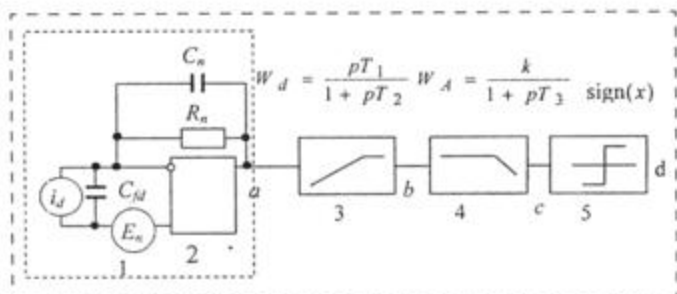


Рис. 6. Модель канала воспроизведения для детектирования следа записи, записанного импульсным способом:

1 — источник шумового напряжения с регулируемой спектральной плотностью; 2 — дифференциальный усилитель; 3 — инерционное дифференцирующее звено; 4 — аperiodическое звено; 5 — пороговое звено. Постоянные времени принимаются равными $T_1 = 15$ нс, $T_2 = 1,5$ нс, $T_3 = 0,7$ нс; p — оператор Лапласа

изображена штриховой рамкой на функциональной модели канала воспроизведения (рис. 6).

На схеме имеется источник сигнала i_d , моделирующий фотоприемник, источник шумового напряжения E_n , определяющий шумовые составляющие входного сигнала, и элементы, моделирующие емкости фотоприемника, соединительных проводов C_{fd} , сопротивления нагрузки C_n . Анализ схемы входной цепи показывает, что существуют различные коэффициенты передачи сигнала воспроизведения, шумового напряжения, которые зависят от параметров эквивалентной схемы замещения входной цепи. На рис. 7 построена амплитудно-частотная характеристика усилителя канала воспроизведения.

Результаты моделирования приведены на рис. 8. Длительность следа записи соответствует тактовой частоте записи 5 МГц и комбинации 1010. Фронты импульсов d , сформированных из продифференцированного сигнала воспроизведения b , точно соответствуют середине следа записи и слабо зависят

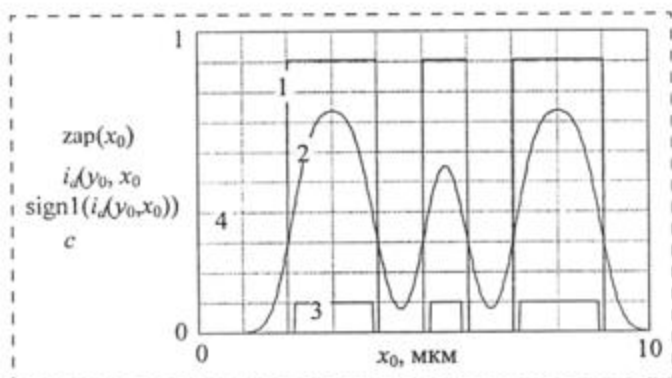


Рис. 5. Воспроизведение следа записи: $i_d(y_0, x_0)$ — нормированный сигнал воспроизведения (кривая 2), определяемый записанной кодовой последовательностью $zap(x_0)$ (кривая 1); $\text{sign} 1(i_d(y_0, x_0))$ — сформированный из $i_d(y_0, x_0)$ сигнал воспроизведения (кривая 3), относительно порогового уровня формирования c (прямая 4)

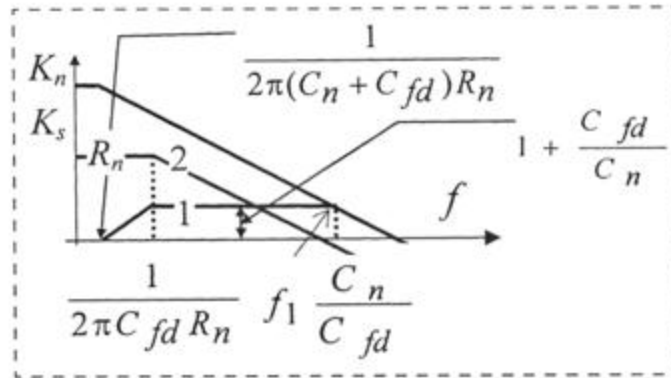


Рис. 7. Частотные характеристики усилителя канала воспроизведения магнитооптической информации для сигнала воспроизведения K_s (кривая 2) и шумовой составляющей сигнала K_n (кривая 1)

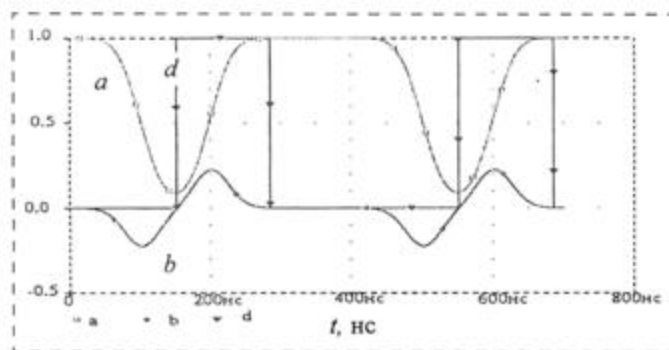


Рис. 8. Воспроизведение следа записи с использованием операции дифференцирования:

a — нормированный сигнал воспроизведения от кодовой последовательности 1010; b — продиференцированный сигнал воспроизведения; d — сформированный сигнал. Ширина дорожки записи равна 1 мкм, радиус светового пучка воспроизведения — 0,5 мкм

от неточностей движения пучка воспроизведения. Временное положение спадов этих импульсов нестабильно (см. рис. 4), поэтому не может быть использовано для идентификации положения следа записи.

По приведенной на рис. 6 модели канала воспроизведения получен коэффициент увеличения среднего квадратического значения шумового напряжения, определяемый как

$$K_{dn} = \sqrt{\frac{U_c(f)}{U_a(f)}},$$

где $\sqrt{U_c(f)}$ — действующее значение шумового напряжения на выходе апериодического звена (точка c); $\sqrt{U_a(f)}$ — действующее значение шумового напряжения на входе инерционного дифференцирующего звена.

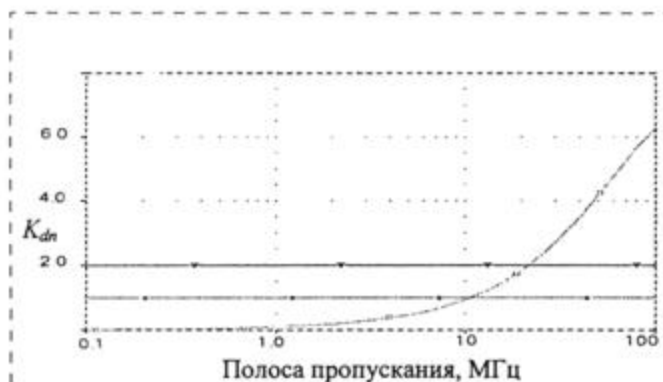


Рис. 9. Коэффициент увеличения действующего значения напряжения шума K_{dn} от полосы пропускания канала воспроизведения

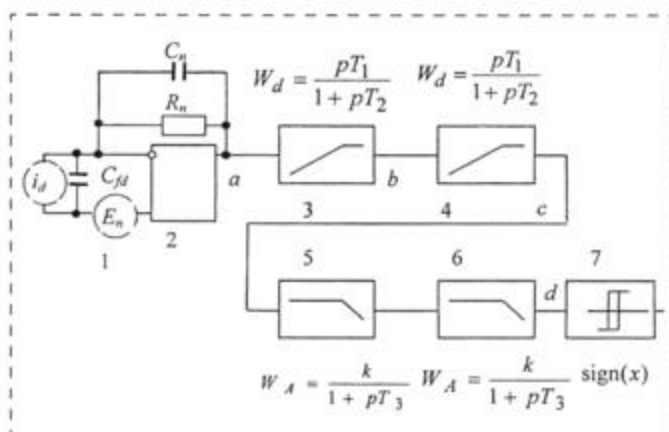


Рис. 10. Модель канала воспроизведения для детектирования экстремальным способом информации, записанной потенциальными методами

Зависимость коэффициента K_{dn} от ширины полосы пропускания приведен на рис. 9. Из рисунка следует вывод о хорошей фильтрации шумов до частоты 10 МГц и ухудшении отношения сигнал—шум в частотном диапазоне от 10 до 100 МГц.

Из анализа данного метода формирования следует вывод, что использование его позволяет получить цифровой сигнал воспроизведения, мало чувствительный к искажениям сигнала при воспроизведении из-за неточностей движения светового пучка воспроизведения относительно расположения оси дорожки записи. Отношение сигнал—шум в системе воспроизведения возрастает незначительно.

Экстремальное детектирование потенциальных методов. Экстремальное детектирование включает выполнение таких операций, как двойное дифференцирование. Функциональная модель канала воспроизведения приведена на рис. 10, где цифрами обозначены: 1 — источник шумового напряжения; 2 — дифференциальный усилитель; 3, 4 — инерци-

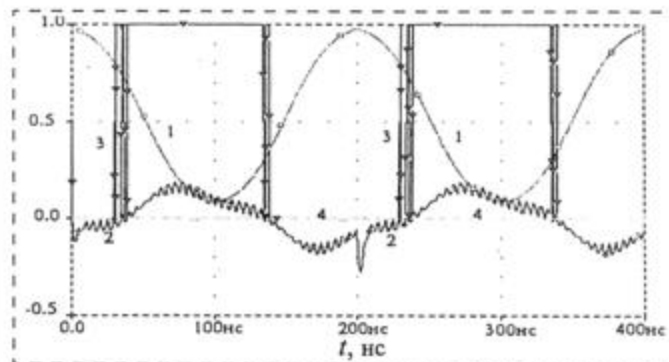


Рис. 11. Сигнал воспроизведения при использовании двойного дифференцирования:

1 — сигнал воспроизведения; 2 — дважды продиференцированный сигнал воспроизведения; 3 — сформированный сигнал воспроизведения; 4 — уровень формирования

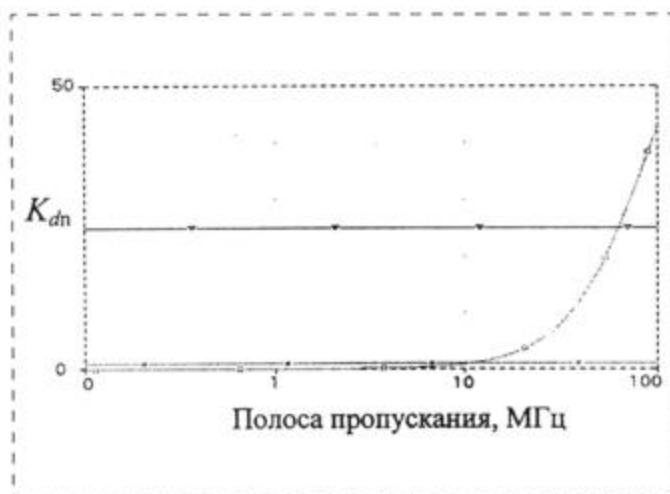


Рис. 12. Коэффициент увеличения действующего значения напряжения шума K_{dn} от полосы пропускания канала воспроизведения

онные дифференцирующие звенья; 5, 6 — апериодические звенья; 7 — пороговое звено. Постоянные времени звеньев модели соответствуют значениям, приведенным на рис. 9.

Результаты анализа процесса формирования сигнала по рассмотренной модели приведены на рис. 11.

На рис. 11 видно, что дважды продифференцированный сигнал 2 содержит значительную шумовую составляющую. Она дает сформированный сигнал 3, содержащий "ложные" импульсы из-за многократного переключения порогового элемента.

Кроме того, положение фронтов сформированного сигнала, так же как и в пороговых методах детектирования, сильно зависит от точности перемещения светового луча воспроизведения относительно следа записи.

Появление большого уровня шумовой составляющей в сигнале воспроизведения иллюстрирует график коэффициента увеличения шумовой составляющей сигнала воспроизведения при использовании двух дифференцирующих элементов (рис. 12). По сравнению с аналогичным графиком (см. рис. 9), наблюдается восьмикратное увеличение шумовой составляющей и, следовательно, такое же ухудшение отношения сигнал—шум.

Список литературы

1. Михайлов В. И. Запоминающие устройства на оптических дисках / В. И. Михайлов, Г. И. Князев, П. П. Макарычев. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
2. Слесарев Ю. Н. Термомагнитная запись для оптических дисковых накопителей информации. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. 142 с.

УДК 681.586.78.049.77:53.072:004.53.08

А. В. Козлов,
М. А. Ревелева, канд. физ.-мат. наук,
Московский государственный институт
электронной техники,
Р. Д. Тихонов, канд. техн. наук,
Научно-производственный комплекс
"Технологический центр" МИЭТ

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ БИПОЛЯРНОГО ДВУХКОЛЛЕКТОРНОГО МАГНИТОТРАНЗИСТОРА

С помощью пакета программ приборно-технологического моделирования ISE TCAD изучались работы латерального двухколлекторного биполярного магниточувствительного транзистора, сформированного в диффузионном кармане. При низком и высоком уровнях инжекции исследовалась зависимость относительной чувствительности по току от распределения носителей заряда. Установлено, что отрицательная чувствительность появляется в результате перераспределения в магнитном поле потоков электронов и дырок, т. е. за счет концентрационно-рекомбинационного механизма.

Развитие современных средств связи, телекоммуникационной и навигационной аппаратуры, средств медицинской диагностики сегодня было бы невозможно без качественных недорогих полупроводниковых датчиков магнитного поля. В целях разработки и изготовления таких датчиков в полупроводниковой электронике почти 35 лет назад появилось новое научно-техническое направление — магнетоэлектроника. За это время изобретено и исследовано множество конструкций датчиков магнитного поля (ДМП) [1], начиная от простейшего элемента Холла и заканчивая сложными симметричными магниточувствительными структурами. Простой дискретный элемент Холла является хорошо изученным датчиком и давно применяется в автомобильной промышленности, однако низкая чувствительность к магнитному полю затрудняет его применение в сложной аппаратуре телекоммуникационных систем. Использование других ДМП, таких как магниточувствительные диоды и резисторы, МОП-транзисторы, а также некоторые тиристоры и биполярные структуры, не дало ожидаемых результатов, хотя в отличие от датчика Холла их чувствительность значительно выше.

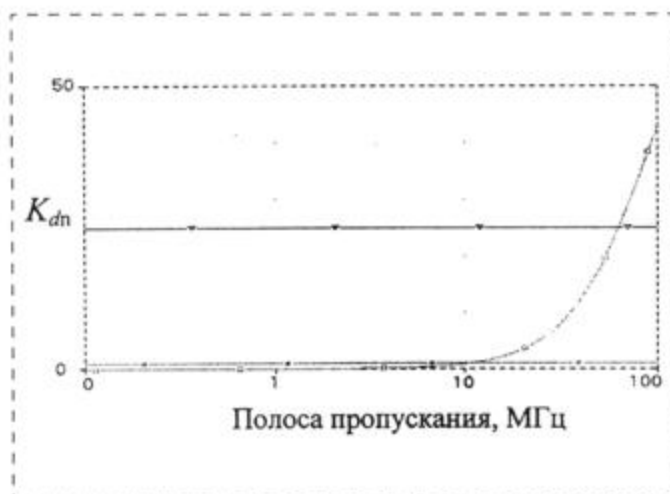


Рис. 12. Коэффициент увеличения действующего значения напряжения шума K_{dn} от полосы пропускания канала воспроизведения

онные дифференцирующие звенья; 5, 6 — апериодические звенья; 7 — пороговое звено. Постоянные времени звеньев модели соответствуют значениям, приведенным на рис. 9.

Результаты анализа процесса формирования сигнала по рассмотренной модели приведены на рис. 11.

На рис. 11 видно, что дважды продифференцированный сигнал 2 содержит значительную шумовую составляющую. Она дает сформированный сигнал 3, содержащий "ложные" импульсы из-за многократного переключения порогового элемента.

Кроме того, положение фронтов сформированного сигнала, так же как и в пороговых методах детектирования, сильно зависит от точности перемещения светового луча воспроизведения относительно следа записи.

Появление большого уровня шумовой составляющей в сигнале воспроизведения иллюстрирует график коэффициента увеличения шумовой составляющей сигнала воспроизведения при использовании двух дифференцирующих элементов (рис. 12). По сравнению с аналогичным графиком (см. рис. 9), наблюдается восьмикратное увеличение шумовой составляющей и, следовательно, такое же ухудшение отношения сигнал—шум.

Список литературы

1. Михайлов В. И. Запоминающие устройства на оптических дисках / В. И. Михайлов, Г. И. Князев, П. П. Макарычев. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
2. Слесарев Ю. Н. Термомагнитная запись для оптических дисковых накопителей информации. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. 142 с.

УДК 681.586.78.049.77:53.072:004.53.08

А. В. Козлов,
М. А. Ревелева, канд. физ.-мат. наук,
Московский государственный институт
электронной техники,
Р. Д. Тихонов, канд. техн. наук,
Научно-производственный комплекс
"Технологический центр" МИЭТ

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ БИПОЛЯРНОГО ДВУХКОЛЛЕКТОРНОГО МАГНИТОТРАНЗИСТОРА

С помощью пакета программ приборно-технологического моделирования ISE TCAD изучались работы латерального двухколлекторного биполярного магниточувствительного транзистора, сформированного в диффузионном кармане. При низком и высоком уровнях инжекции исследовалась зависимость относительной чувствительности по току от распределения носителей заряда. Установлено, что отрицательная чувствительность появляется в результате перераспределения в магнитном поле потоков электронов и дырок, т. е. за счет концентрационно-рекомбинационного механизма.

Развитие современных средств связи, телекоммуникационной и навигационной аппаратуры, средств медицинской диагностики сегодня было бы невозможно без качественных недорогих полупроводниковых датчиков магнитного поля. В целях разработки и изготовления таких датчиков в полупроводниковой электронике почти 35 лет назад появилось новое научно-техническое направление — магнетоэлектроника. За это время изобретено и исследовано множество конструкций датчиков магнитного поля (ДМП) [1], начиная от простейшего элемента Холла и заканчивая сложными симметричными магниточувствительными структурами. Простой дискретный элемент Холла является хорошо изученным датчиком и давно применяется в автомобильной промышленности, однако низкая чувствительность к магнитному полю затрудняет его применение в сложной аппаратуре телекоммуникационных систем. Использование других ДМП, таких как магниточувствительные диоды и резисторы, МОП-транзисторы, а также некоторые тиристоры и биполярные структуры, не дало ожидаемых результатов, хотя в отличие от датчика Холла их чувствительность значительно выше.

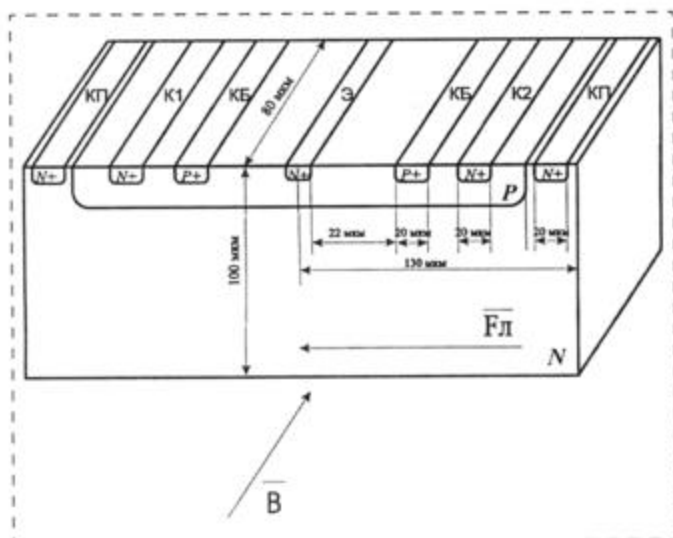


Рис. 1. Структура латерального биполярного двухколлекторного магниточувствительного транзистора:

Э — эмиттер; КБ — контакт к базе; К1 — левый коллектор; К2 — правый коллектор; КП — контакт к подложке; В — индукция магнитного поля; $F_{\text{л}}$ — сила Лоренца

В связи с этим особый интерес с точки зрения повышения магниточувствительности представляет конструкция латерального двухколлекторного биполярного магниточувствительного транзистора (ДКБМТ), сформированного в диффузионном кармане (рис. 1). Формирование транзистора осуществляется по технологии, совместимой с КМОП-технологией ИС. Исходным материалом служит кремниевая подложка, легированная фосфором, в которой далее путем диффузии бора создается глубокий карман p -типа. В нем происходит формирование элементов интегральной схемы: $n+$ — эмиттера (Э) и коллекторов (К), а также $p+$ — омических областей распределенного базового контакта (Б). За карманом симметрично относительно эмиттера располагаются $n+$ -омические области распределенного контакта к подложке (П). Выбор пары биполярных совмещенных n — p — n -транзисторов не случаен: подвижность инжектируемых из эмиттера электронов почти в 3 раза выше, чем дырок, а так как дрейфовая скорость пропорциональна подвижности носителей, то сила Лоренца, влияющая на движение носителей тока, будет сильнее их отклонять. А как известно, принцип действия ДКБМТ основан на перераспределении потоков носителей из эмиттера в сторону рабочих коллекторов под действием силы Лоренца, влияющей на заряженные частицы в магнитном поле.

Ранее [2] изучалась работа n — p — n биполярного магнитотранзистора, сформированного в кармане, где переход карман — подложка служил изоляцией p — n -перехода транзистора от остальной схемы. Равная резистивная нагрузка включалась в цепи кол-

лекторов, разность падения напряжений на которой при увеличении потенциала базы являлось параметром чувствительности к магнитному полю по напряжению. Большое расстояние между активными областями эмиттера и коллекторов, а также высокая скорость рекомбинации носителей в объеме и на поверхности полупроводника не позволяет достичь приемлемого коэффициента передачи тока в коллекторы, однако выбор такой конструкции транзистора позволяет добиться приемлемого значения чувствительности к магнитному полю. Объединение омических контактов базы и подложки позволяет p — n -переходу карман — подложка оттягивать часть электронной плотности из кармана в подложку и, таким образом, распределять концентрацию электронов в кармане между рабочими коллекторами в соответствии с магнитным полем и уровнем инжекции из эмиттера. Изучены и проанализированы также конструкции магнитотранзистора, расположенные непосредственно в подложке [3].

С помощью пакета прикладных программ системы сквозного приборно-технологического моделирования приборов ISE TCAD швейцарская фирма ISE AG изучала работу n — p — n латерального биполярного ДКБМТ, сформированного в диффузионном p -кармане, в магнитном поле. Направление магнитного поля с индукцией $B = 1$ Тл выбиралось вдоль эмиттера и перпендикулярно плоскости поперечного сечения, как показано на рис. 1. На коллекторах устанавливалось напряжение питания $U_{\text{к1}} = U_{\text{к2}} = 1,5$ В, на эмиттере $U_{\text{э}} = 0$, а на базу и подложку подавалось плавающее напряжение $U_{\text{бэ}} = U_{\text{пэ}} = 0,5 \pm 1$ В, что обеспечивало смещение эмиттерного перехода в прямом направлении (рис. 2).

В результате изучения работы магнитотранзистора в таком режиме выявлены два механизма преобразования воздействия магнитного поля на

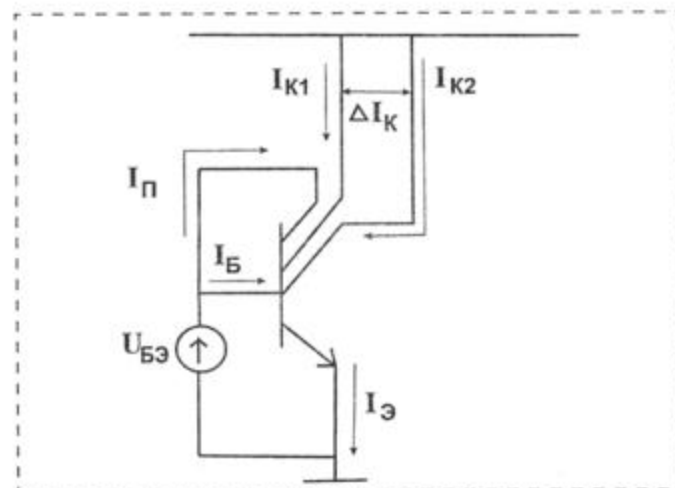


Рис. 2. Схема включения ДКБМТ

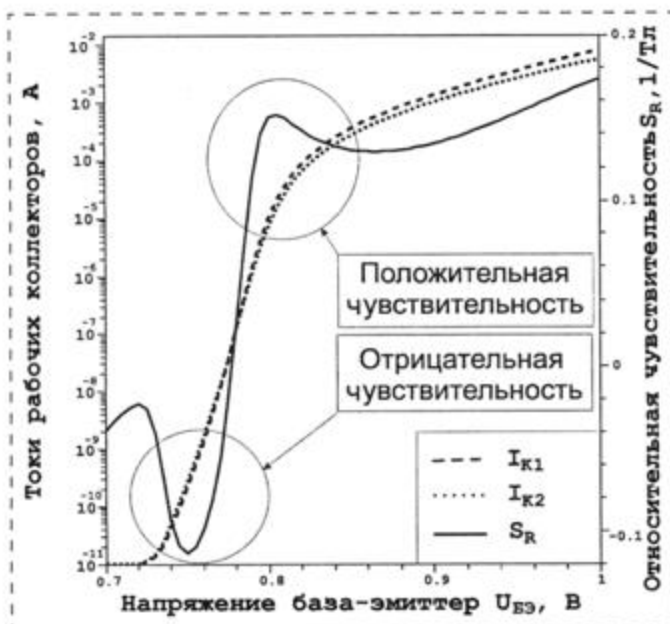


Рис. 3. Зависимость относительной по току магниточувствительности от потенциала базы транзистора, находящегося в магнитном поле $B = 1 \text{ Тл}$

относительную по току чувствительность, в соответствии с чем прибор проявляет как положительную, так и отрицательную чувствительность к воздействию магнитного поля. При моделировании работы транзистора учитывался как эффект Холла, так и модуляция инжекции из эмиттера в результате магнитоконцентрационного эффекта. Как известно, относительная чувствительность магнитотранзистора — это отношение разности токов рабочих коллекторов к их сумме и магнитной индукции:

$$S_R = \frac{dI_K}{dB} \frac{1}{I_{K\Sigma}}, \quad (1)$$

где dI_K/dB — изменение разности коллекторных токов с изменением магнитной индукции поля; $I_{K\Sigma}$ — суммарный ток двух рабочих коллекторов.

Таким образом, согласно (1) повышение чувствительности достигается за счет увеличения разности токов рабочих коллекторов при малой силе токов коллекторов. Уже при подаче небольшого потенциала на базу транзистора (около 0,7 В), т. е. при смещении эмиттерного перехода в прямом направлении, в коллекторах начинают протекать токи, обеспечивающие высокое значение относительной магниточувствительности. Зависимость относительной чувствительности (1) от напряжения на эмиттерном переходе представлено на рис. 3. В соответствии с двумя механизмами преобразования воздействия магнитного поля транзистором его магниточувствительность может иметь как положительные, так и отрицательные значения. Отри-

цательная чувствительность была обнаружена экспериментально [4].

Для понимания возникновения отрицательной чувствительности рассмотрим два режима работы транзистора: при низком уровне инжекции (НУИ) из эмиттера ($U_{бэ} = 0,74 \text{ В}$), что соответствует отрицательной по току чувствительности, и высоком уровне инжекции (ВУИ) ($U_{бэ} = 1 \text{ В}$), что соответствует положительным значениям магниточувствительности по току прибора.

Работа прибора в первом режиме более выгодна по следующим причинам: во-первых, магнитотранзистор потребляет меньшую мощность, так как увеличение потребляемой мощности пропорционально возрастанию тока эмиттера, который в свою очередь растет с увеличением потенциала базы, и, во-вторых, что является следствием первой причины, при малой потребляемой мощности нагрев транзистора гораздо меньше:

$$P_{\text{потр}} = U_{\text{и.п}} I_{\text{э}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{и.п}}$ — напряжение источника питания; $I_{\text{э}}$ — ток эмиттера.

При данном уровне инжекции, несмотря на полную симметрию прибора, распределения носителей заряда в левой и в правой частях транзистора в магнитном поле различаются. Это схематически показано на рис. 4, а и б. Часть носителей заряда, инжектируемых из эмиттера, отклоняются от заданной траектории движения под действием силы Лоренца

$$F_L = q[v \times B], \quad (3)$$

где q — заряд электрона; v — скорость движения электрона; B — магнитная индукция.

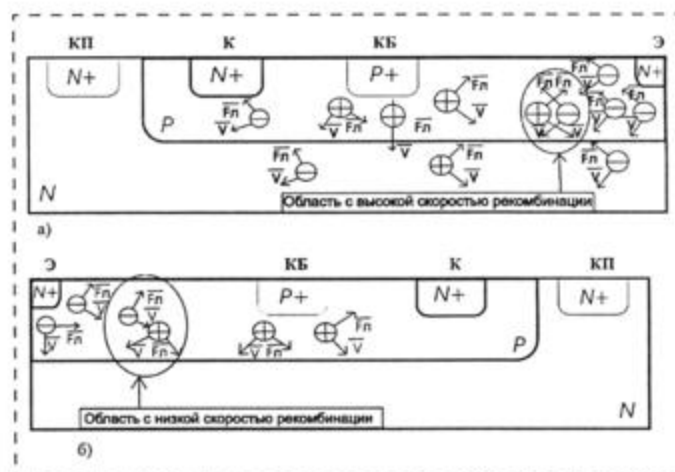


Рис. 4. Магнитотранзистор при низком уровне инжекции из эмиттера:

а — левая часть транзистора; б — правая часть (Э — эмиттер, KB — контакт к базе, К — правый коллектор, КП — контакт к подложке)

Направление вектора скорости электронов противоположно с направлением вектора тока эмиттера, согласно чему сила Лоренца, действующая на отрицательно заряженные частицы, прижимает потоки электронов в левой части к поверхности полупроводника (рис. 4, а), а в правой — к границе перехода карман — подложка (рис. 4, б). Уменьшение траектории движения неосновных носителей заметно снижает сопротивление активной базы левой части транзистора, а сопротивление правой части базы при этом, наоборот, возрастает. Однако действие силы Лоренца распространяется также и на положительно заряженные дырки из контактной базы. Она отклоняет их в ту же сторону, что и электроны. Но поскольку движение дырок из базового контакта направлено сверху вниз, то согласно (3) отклоняются они в сторону эмиттера в левой части и в сторону правого коллектора в правой части. Таким образом, движение основных (дырок) и неосновных (электронов) носителей заряда в левой части кармана, служащей базой, навстречу друг другу, определяет области повышенной рекомбинации, что уменьшает концентрацию неосновных носителей.

Транзистор, выбранный для моделирования, имеет следующие размеры: длина — 260 мкм, ширина — 80 мкм и толщина — 100 мкм. Длина диффузионного кармана составляет 160 мкм (по 80 мкм в левую и в правую стороны), а глубина около 5 мкм. В правой части сила Лоренца отклоняет влево электроны, инжектируемые донной частью эмиттера, "боковые" же электроны отклоняются в основном вниз согласно формуле (3). Соответственно, в отличие от левой части, движение носителей здесь происходит в разные стороны (электроны — вниз и влево, дырки — вверх и вправо), что определяет более высокую силу тока второго коллектора. Такая асимметрия распределения носителей заряда влияет на токи рабочих коллекторов, что в свою очередь определяет чувствительность транзистора. Так как ток второго коллектора при заданном уровне инжекции выше первого, а токи рабочих коллекторов сравнительно небольшие, отрицательная относительная магниточувствительность по току принимает высокие значения. Под действием силы Лоренца носители обоих типов рекомбинируют в объеме и на поверхности транзистора, что уменьшает концентрацию электронов в кармане и в подложке прибора. В силу различия концентраций носителей заряда в левой и в правой частях транзистора скорость рекомбинации также различна. Таким образом, скорости рекомбинации носителей асимметричны. На рис. 5 (см. третью сторону обложки) показана разность распределений скоростей рекомбинации носителей по механизму Шокли—Рида—Холла в магнитном поле и без поля, где иллюстрируется описанная выше рекомбинация.

Как следует из распределения, максимальная скорость рекомбинации наблюдается в эмиттере, а также слева от него, где в магнитном поле происходит перемешивание электронов и дырок. Из правой же части вблизи эмиттера электроны, наоборот, уходят под действием силы Лоренца, что определяет там низкую скорость рекомбинации носителей заряда.

Дальнейшее увеличение потенциала распределенного контакта базы вызывает более интенсивную инжекцию электронов из эмиттера, характеризующуюся высокой скоростью и большим их током, а также током дырок из базового контакта. Высокие концентрации электронов и дырок, поступающих из эмиттера и контактов базы, приводят к появлению электронно-дырочной плазмы в кармане транзистора и в подложке, характеризующейся высокой скоростью рекомбинации носителей заряда (рис. 6, см. третью сторону обложки). Это вызывает уменьшение носителей заряда обоих типов, и дальнейший приток электронов из эмиттера компенсируется по условию электронейтральности вновь поступающими дырками из контактной базы. Таким образом, при высоком уровне инжекции в любой момент времени концентрация носителей, как электронов (рис. 7, а, см. третью сторону обложки), так и дырок (рис. 7, б), приблизительно одинакова. Высокие концентрация и скорость вновь инжектируемых электронов приводят к увеличению силы Лоренца (3), отклоняющей их к одной из граней полупроводника, в результате чего ток носителей в кармане прибора возрастает:

$$I = jS = qnvad, \quad (4)$$

где j — плотность тока носителей заряда; S — площадь полупроводника, через которую протекают носители; n — концентрация электронов; a — толщина транзистора в направлении Z ; d — толщина транзистора в направлении Y .

Как известно, скорость рекомбинации — число электронно-дырочных состояний, которые рекомбинируют в единицу объема в единицу времени. Согласно [5], скорость рекомбинации Шокли—Рида—Холла прямо пропорциональна произведению концентрации основных и неосновных носителей:

$$U = \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} (pn - n_i^2) N_t}{\sigma_n \left[n + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \right] + \sigma_p \left[p + n_i \exp\left(-\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \right]}, \quad (5)$$

где σ_p , σ_n — сечения захвата электрона и дырки; v_{th} — тепловая скорость носителей, равная $(3kT/m^*)^{1/2}$; m^* — эффективная масса; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; N_t — концен-

трация ловушек; n_i — собственная концентрация носителей; p — концентрация дырок; E_i — собственный уровень Ферми; E_l — уровень ловушек. Таким образом, скорость рекомбинации при высоком уровне инжекции намного выше, чем при низком.

Однако при данном уровне инжекции механизмы рекомбинации носителей не могут повлиять на распределение носителей заряда в транзисторе в целом из-за инжекции дополнительных носителей из эмиттера и базового контакта. Распределение носителей в результате действия силы Лоренца в магнитном поле по верхней и нижней граням полупроводника в левой и в правой частях транзистора приводит к появлению значительного холловского поля E_x , причем в левой части прибора вектор поля направлен снизу вверх, а в правой — сверху вниз (рис. 8). Объяснением этому может служить комплиментарная пара датчиков Холла, соединенных вместе контактами, из которых вытекает ток (эта пара является эквивалентом транзистора). При этом верхней гранью в данном случае служит поверхность полупроводника, а нижней — граница p - n -перехода карман — подложка. Наряду с холловским полем, в связи с интенсивной инжекцией дырок из базового контакта в глубь кармана, а также высокой концентрацией акцепторной примеси на поверхности в транзисторе сверху вниз как в левой, так и в правой частях возникают "тянущие поля" E_z , способствующие изменению траектории движения неосновных носителей заряда в базе. "Тянущее поле" является результатом градиента концентрации дырок в кармане при легировании бором. Таким образом, этим полем можно управлять за счет дополнительного легирования кармана. Взаимодействие этих двух полей в кармане транзистора уменьшает влияние их на электроны в левой части и усиливает влияние в правой части прибора, прижимая электроны вглубь, что приводит к увеличению потока электронов и скорости рекомбинации в левой части кармана. Интенсивная инжекция электронов в правой части прибора приводит к отклонению части электронов в подложку, где в дальнейшем происходит их рекомбинация с дырками. Так как и холловское поле, и "тянущее поле" являются функциями концентрации носителей заряда, то с увеличением уровня инжекции взаимодействие полей

усиливает влияние на движение частиц в объеме полупроводника. В связи с тем, что более интенсивная инжекция электронов, отклоняемых в левую часть транзистора, вызывает экспоненциальное увеличение тока рабочих коллекторов, относительная магниточувствительность по току в общем случае падает и при $U_{бэ} = 1$ В не превышает значения $S_R = 0,15$ Тл⁻¹.

Проведенное исследование дает возможность полагать, что относительная чувствительность по току двухколлекторного транзистора, сформированного в диффузионном кармане, определяется, помимо геометрической реализации транзистора, уровнем инжекции из эмиттера, что является, в свою очередь, функцией напряжения смещения на p - n -переходе база — эмиттер. Установлено, что при низком уровне инжекции работа транзистора в магнитном поле в основном определяется механизмами объемной и поверхностной рекомбинации, где высокая скорость рекомбинации носителей в приборе дает ощутимый вклад в уменьшение рабочего тока коллектора этой части. При высоком уровне инжекции механизмы рекомбинации также присутствуют, однако уже не являются определяющими, в отличие от действия силы Лоренца на большой ток электронов, создаваемый высокой концентрацией инжектируемых носителей. Воспроизводимость ВАХ прибора определяет режим его функционирования в отрицательном диапазоне значений чувствительности при низком уровне инжекции электронов из эмиттера. Снижение рабочих токов в заданном режиме работы транзистора обеспечивает также уменьшение потребляемой и рассеиваемой мощности прибора.

Дальнейшее изучение работы биполярного транзистора позволит оптимизировать структуру по основному параметру магниточувствительности по току.

Список литературы

1. Балтес Г. П., Попович Р. С. Интегральные полупроводниковые датчики магнитного поля // ТИИЭР. 1986. Т. 74. № 8. С. 60—90.
2. Амеличев В. В., Галушков А. И., Миргородский Ю. Н., Тихомиров П. А., Чаплыгин Ю. А., Шорин М. В., Шубин С. В. Моделирование биполярного двухколлекторного магнитотранзистора и определение режима термокомпенсации изменения чувствительности // Датчики и системы. 1999. № 6. С. 34—42.
3. Глауберман М. А., Егоров В. В., Канищева Н. А., Козел В. В. Особенности двумерного моделирования дрейфовых инжекционных магниточувствительных структур // Журнал технической физики. 1997. Т. 67 № 7. С. 39—41.
4. 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.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М.: Мир, 1984. С. 43.

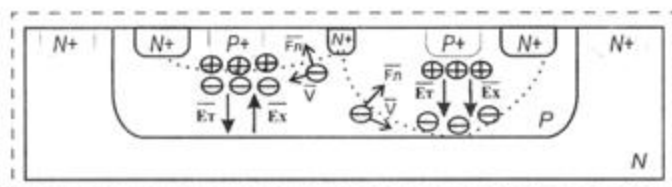


Рис. 8. Работа транзистора при высоком уровне инжекции из эмиттера

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 621.3.049.77

А. В. Путилов, д-р техн. наук, проф.,
Минпромнауки России, г. Москва

О КОНЦЕПЦИИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ В ОБЛАСТИ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Изложен проект концепции инновационного развития результатов в области исследования и разработок наноматериалов и нанотехнологий, направленный на ускорение реализации отечественных достижений на практике.

Введение

В настоящее время происходят революционные изменения в сфере высоких технологий: электронике, информационных технологиях, микромеханике и других областях человеческой деятельности, связанных с фундаментальными и прикладными исследованиями, конструированием и практическим использованием структур, материалов и устройств, элементы которых имеют размеры менее 100 нм, а также с развитием технологий их изготовления (нанотехнологии) и методов диагностики. За рубежом работы в этой области стремительно развиваются в течение последних лет в рамках ряда приоритетных программ правительств Японии, США, ФРГ, Франции, Китая и других стран.

В России целевое бюджетное финансирование работ в области наноматериалов и нанотехнологий осуществляется с начала 90-х годов прошлого века в рамках нескольких программ, которые входят как соответствующие разделы в ФЦНТП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники", ФЦП "Национальная технологическая база" и ряда других программ. Государственная поддержка этих работ, хотя и несоизмеримая по своим масштабам с их финансированием в других странах, способствовала развитию этого перспективного направления, позволила сохранить научный потенциал, достаточно высокий уровень исследований и лидирующие позиции в некоторых областях нанонауки.

Однако внимание со стороны государства к проблемам, связанным с работами по наноматериалам и нанотехнологиям, следует признать недостаточным, так как уже в недалеком будущем развитие высокотехнологичных отраслей техники (электроника, связь и др.) и социальной сферы (медицина, охрана окружающей среды и др.), определяющее уровень развития страны, ее обороноспособность и национальную безопасность, будет в значительной степени обусловлено достижениями в этой области.

В настоящей концепции под обобщенным понятием *наноматериалы* понимаются структуры и материалы с качественно новыми свойствами, возникающими благодаря уменьшению в одном или нескольких измерениях размеров структурных элементов до нанометрового масштаба, а технологии их получения и, в определенных случаях, последующая работа с ними — *нанотехнологиями*.

При упоминании о наноматериалах и нанотехнологиях имеется в виду широчайший спектр не всегда напрямую связанных между собой проблем в различных областях науки и техники, где уже используются соответствующие технологии и методы. Поэтому целесообразно рассматривать нанотехнологии не как единое целое, а как обобщенное понятие, конкретизируемое применительно к решению соответствующих задач.

В настоящей концепции, сформированной на основе анализа достижений отечественной фундаментальной и прикладной науки в области наноматериалов и нанотехнологии (обобщенное определение — *наносистемы*), а также особенностей и конкурентных преимуществ научно-технологического потенциала России, раскрыта значимость практического использования междисциплинарных результатов исследований и разработок в области наносистем, сформулированы подходы и принципы инновационного развития основ создания и использования наноматериалов и нанотехнологий.

1. Важнейшие положения инновационного развития основ нанотехнологий

Широкое практическое использование нанотехнологий является важнейшим стратегическим направлением развития отечественных высокотехнологичных производств и освоения на новой ос-

нове подходов к инновационному преобразованию отечественной промышленности.

Государственная научно-техническая и инновационная политика в этой сфере деятельности должна иметь прежде всего технологическую направленность, включая анализ рынка наукоемкой продукции и определение государственных технологических нужд в этой области, прогнозирование возможного развития отдельных технологических направлений в области создания наносистем и целевую поддержку тех из них, которые наиболее близки к введению в хозяйственный оборот (элементы наноэлектроники, нанодатчики и пр.), формирование новых технологических укладов в научно-технической и производственной сферах.

Роль государства в обеспечении поэтапного перехода от исследований к использованию их результатов для развития основ наноиндустрии заключается в создании благоприятных условий для поддержки проведения работ, включая информационную поддержку, формирование механизмов введения в хозяйственный оборот результатов исследований и разработок, созданных за счет средств федерального бюджета, а также организацию системы учета и регистрации сделок, совершаемых с ними. Это может быть осуществлено путем создания "Российского информационного фонда наносистем" и разработки подходов к добровольной государственной регистрации нанотехнологий, типов и способов получения наноматериалов, других элементов формирования основ будущей наноиндустрии.

Мероприятия по реализации концепции будут направлены на обеспечение эффективного использования бюджетных средств и должны способствовать поддержке перспективных исследований и разработок в таких областях, как новые наноматериалы и их обработка, наноэлектроника, компьютерная техника, информационные технологии, медицина и здравоохранение, защита окружающей среды, нетрадиционная энергетика, химическая и фармацевтическая промышленность, биотехнология и геновая инженерия, а также способствовать укреплению национальной безопасности.

2. Характерные особенности проблемы создания наноматериалов и разработки нанотехнологий их инновационного развития

Наиболее важные особенности в характеристике наносистем вызваны не конкретным фактором уменьшения размера частиц, элементов или структур, а принципиально новыми качественными явлениями, присущими наномасштабу, или ставшими преобладающими в этом масштабе размеров. Необычные явления проявляются в изменении ха-

рактеристик и свойств материалов и их структурных элементов, включая влияние на макроскопические параметры наносистем закономерностей квантовой механики. На наноуровне происходит формирование таких неизвестных еще недавно объектов, как квантовые провода и квантовые точки, тонкие пленки с уникальными свойствами, сверхрешетки, углеродные нанотрубки, биологические наноструктуры на основе ДНК и др. Все это позволяет существенно улучшить свойства материалов и создать устройства с возможностями, которые ранее были недостижимы на основе применения традиционных технологий. Такие новые формы наносистем предвещают революционные изменения в технологии и индустрии и в ближайшем будущем позволят полностью использовать новые закономерности их поведения.

Проведение комплексных междисциплинарных исследований на базе высокотехнологичных организаций, прежде всего — академических институтов и государственных научных центров Российской Федерации, с использованием возможностей малого наукоемкого бизнеса, позволит разработать научные основы нанотехнологий, новые типы наноматериалов, обеспечить создание отечественного специального технологического оборудования для нанотехнологий, а также средств диагностического и метрологического обеспечения при освоении нанотехнологических процессов (интеллектуальные интерферометрические системы, суперпрецизионные нанопозиционеры и др.), а также формирование элементов инфраструктуры будущей инновационной наноиндустрии.

3. Назревающая революция в производстве — нанотехнологические подходы

Благодаря туннельным микроскопам, которые были созданы около 20 лет назад, появились новые возможности в исследовании структур, характеризующихся наноразмерными параметрами. Методы молекулярно-пучковой эпитаксии позволяют осуществлять "конструирование" подобных структур и являются основой будущего крупномасштабного получения сложных систем с наноразмерными параметрами. Растровые туннельные микроскопы и другие исследовательские комплексы раскрыли новое восприятие веществ в наноразмерном диапазоне, создали предпосылки для измерения наноструктур и проведения технологических операций с ними. В результате развития вычислительных программно-аппаратных комплексов стало возможным моделирование поведения материалов и систем в наномасштабах. В настоящее время развиваются исследования в области наноструктур и наноматериалов, которые позволяют получить

принципиально новые результаты. Традиционные модели и представления о свойствах материалов и микросистем основаны на представлениях о минимальных размерах элементов, которые в основном значительно превышают 100 нм. Если, по крайней мере, одно измерение материального объекта значительно меньше этого критического размера, часто обнаруживаются особые свойства систем, которые нельзя объяснить в рамках существующих моделей и теорий. Так, в рамках различных научных направлений создаются и анализируются наноструктуры, чтобы обнаружить новые явления в промежуточном масштабе между отдельными молекулами и сотнями тысяч молекул, когда формируется понятие отдельной фазы. Наносистемы обеспечивают возможность создания материалов сборкой в атомно-молекулярных масштабах (в идеале с использованием явления самоорганизации), формирование объектов методом ультраминиатюризации путем выделения более мелких структур из крупных элементов конкретных фаз.

Появляется практическая возможность конвергенции неорганических, органических и биологических объектов, что позволяет создавать принципиально новые микромашины, микромеханизмы, роботы и биокомпьютеры, интеллектуальные материалы, новые типы медицинских технологий. По существу речь идет о начале новой технологической революции.

В настоящее время лишь формируются некоторые из принципов, используемых для создания наноструктур "конструированием" из фрагментов. Каждый успех в понимании физических, химических и биологических свойств наносистем открывает новые возможности и принципы построения, сборки наноструктур и наноустройств.

В академических институтах активно ведутся исследования фундаментальных закономерностей формирования и использования наносистем, в программах государственных научных центров Российской Федерации на 2003 и последующие годы предусмотрено проведение разработок в области наноматериалов и нанотехнологий в различных сферах применения: информационных технологиях и электронике, биотехнологии и здравоохранении, машиностроении и транспортных системах, энергетике и производственных технологиях различной направленности. Задача Минпромнауки России совместно с РАН и другими федеральными органами исполнительной власти обеспечить эффективную координацию этих работ.

4. Потенциальные возможности развития основ нанотехнологий

На базе полученных результатов в области наноматериалов и нанотехнологических разработок уже сейчас можно выделить следующие направления инновационного развития реального сектора экономики и социальной сферы.

Нанoeлектроника и компьютерные технологии. Все более широкое применение находят нанотехнологии в информационной сфере, постепенно вытесняя старые технологии для производства магнитных головок компьютерных дисков (рынок этих систем в конце девяностых годов оценивался более, чем в 30 миллиардов долларов). Потенциальные возможности использования нанотехнологий включают в себя: а) наноструктурные микропроцессорные устройства со сниженными энергопотреблением и стоимостью на один логический элемент, повышающие эффективность компьютеров в миллионы раз; б) системы связи с повышенными частотами прохождения сигналов и более эффективным использованием оптического спектра; в) запоминающие устройства с малой массой при мощностях на уровнях многих терабайт, в тысячи раз более эффективные, чем имеющиеся в настоящее время; г) интегрированные системы нанодатчиков или сенсоров, способные собирать, перерабатывать и передавать большие количества данных при минимальных размерах, массе и энергопотреблении.

Новые конструкционные и функциональные материалы. Области применения наносистем: а) получение наноструктурированных металлических материалов, керамики и полимеров с точными формами изделий без дополнительной обработки; б) печать на различных носителях, усовершенствованная благодаря частицам наноразмерных масштабов, которые дают возможность совершенствования красок и пигментов; в) металлокерамические твердые сплавы и металлопокрытия в наноразмерных слоях, а также нанопокрывания для режущих инструментов; г) материалы для применения в электронике, компьютерных и телекоммуникационных технологиях; д) новые эталоны (в частности, нанопорошки) для измерений в наномасштабах и формирования наноструктур; е) изготовление нанотехнологическими методами материалов для микросхем с высокими уровнями сложности и функциональности; з) разработка облегченных наноструктурированных конструкционных материалов, которые в десятки раз прочнее стали.

Применение нанотехнологий в машиностроении. В машиностроительных технологиях нанопозиционирование обрабатывающих инструментов позволяет обеспечить принципиально новые возможности в качестве изготовления изделий. Подобные под-

ходы реализуются в настоящее время на основе эффекта гигантской магнитострикции, совмещенной с интерферометрическим контролем позиционирования (изделия типа "нановинт", "наностол" и др.). При использовании нанотехнологических подходов в машиностроении можно ожидать:

- создания конструкций с наноструктурированным поверхностным слоем и наноразмерными покрытиями;
- расширения номенклатуры ответственных узлов и агрегатов изделий машиностроения, изготавливаемых методами прецизионной обработки;
- изготовления суперточных металлографических форм для выпуска трудно подделываемых ценных бумаг, акцизных марок и др.;
- изготовления элементов микросистемной техники и сверхминиатюризации изделий.

Аэрокосмические нанотехнологии и наноматериалы. Наноструктурирование имеет решающее значение для разработки и изготовления отличающихся малой массой и высокой прочностью термически устойчивых материалов для самолетов, ракет, космических станций и исследовательских спутников. Кроме того, космические условия с низкой гравитацией и высоким вакуумом могут обеспечить прорывные направления в самих технологиях получения наноструктур и наносистем. Космические технологические установки могут стать одним из важных путей создания наносистем. Области применения наноструктур в аэрокосмических системах:

- устойчивые к космической радиации компьютерные системы с малым энергопотреблением и высокими эксплуатационными характеристиками;
- наномасштабное приборное обеспечение для космических станций и перспективных спутников малых размеров;
- авионика (авиационная электроника) нового поколения на основе наноструктурных датчиков и наноэлектроники;
- теплозащитные, жаропрочные и износостойкие наноструктурированные покрытия;
- наномодифицированные полимеры и полимерные композиты с повышенными усталостными характеристиками;
- увеличение в несколько раз энергетической эффективности солнечных батарей и развитие альтернативных энергетических систем.

Нанотехнологии в биологии, медицине и здравоохранении. Биологически формируемые наносистемы и материалы в настоящее время создают в основном методами естественного копирования. Искусственные неорганические и органические наномасштабные элементы можно вводить в клет-

ки для диагностики (например, квантовые точки при визуализации), а также потенциально в качестве активных компонентов при терапии. Обеспеченное наноэлектроникой повышение вычислительной мощности ЭВМ позволит характеризовать макромолекулярные сети в реальных биологических системах. Такое моделирование необходимо при разработке биологически совместимых имплантатов и в процессе разработки перспективных лекарственных препаратов. Области возможного применения наносистем:

- быстрое, более эффективное установление первичной структуры генома, обеспечивающее революцию в диагностике и терапии;
- эффективное и менее дорогостоящее лечение с использованием датчиков и дистанционных устройств;
- новые рецептуры и технологии доставки лекарственных препаратов к органам человека, которые расширят их терапевтический потенциал;
- более стойкие и устойчивые к отторжению искусственные ткани и органы;
- создание принципиально новых слуховых и зрительных аппаратов;
- системы датчиков (биосенсоров), которые будут выявлять на ранних стадиях возникающие заболевания в организме, что может переориентировать стратегию медицинской помощи с лечения заболеваний на их раннее обнаружение и предотвращение.

Нанотехнологии в переработке энергоносителей, нефтехимии и ядерной энергетике. Нефтепереработка с получением ценных химических продуктов и ядерная энергетика — две области, где наноматериалы и другие наносистемы уже нашли промышленное применение. Несколько новых направлений служат иллюстрацией нанотехнологического потенциала для реализации в уже сложившемся реальном секторе экономики:

- использование кристаллических материалов как носителей катализаторов с хорошо структурированными размерами пор в диапазоне 1 нм, причем их использование уже стало базисом рынка цеолитных катализаторов с объемом продаж около 30 млрд долл. в год;
- разработка упорядоченного мезопористого материала с размерами пор в диапазоне 10–100 нм, что позволит применять такие системы при удалении ультрадисперсных загрязнений;
- создание адсорбентов водорода на основе наноструктур, которое может обеспечить перевод автотранспорта на экологически чистый вид топлива;
- полимерные материалы, армированные наночастицами, для изделий различных отраслей промышленности, где широкое использование этих

нанокмполитов может привести к заметной экономии.

Ультрадисперсные материалы уже нашли применение в изготовлении элементов и структур для ядерной энергетики: тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, систем управления, безопасности и др. Потенциальные преимущества нанотехнологий проявляются в наноробототехнике и интеллектуальных системах управления качеством сборки и эксплуатации ядерных систем, обеспечении охраны окружающей среды при хранении и переработке отработавшего ядерного топлива и мониторинга с помощью нанодатчиков всех технологических процедур. Использование нанополтров для разделения сред в производстве и переработке ядерного топлива может обеспечить повышение эффективности ядерной энергетики. Компьютерное моделирование поведения систем в наномасштабах будет применяться для обеспечения повышенной безопасности ядерных объектов.

Наносистемы в биоинженерии и агрокомплексе.

Биосинтез веществ и биопереработка сырья обещают принципиально новые пути изготовления химических, пищевых и фармацевтических продуктов. Интеграция биологических "строительных блоков" в синтетические материалы и перспективные устройства на их основе (например, "биочипы" — биотехнологические аналоги электронных систем) позволит сочетать биологические функции с другими полезными свойствами функциональных материалов. Использование принципов функционирования биологических наносистем составляет большую область исследований для многих дисциплин и потенциальное поле для новых технологий (например, активно развивающаяся область биомиметической химии).

Наносистемы внесут вклад непосредственно в достижения агротехники: биоразлагаемые химикаты для подкормки растений и защиты от насекомых, генетическое усовершенствование видов сельскохозяйственных животных и сортов растений, доставка генов и лекарственных препаратов в ветеринарной практике, а также основанные на наностовах технологии для проверки ДНК. В частности, такие технологии позволят в перспективе определять, какие гены наиболее выражены в растениях (например, как оно подвержено воздействию холода или засухи). В целом, применение нанотехнологий в агротехнике еще только начинает оцениваться и сулит в будущем большие перспективы.

Наносистемы в развитии науки и образования.

Наука о создании и использовании наноструктур в своем развитии как междисциплинарная область знаний будет постоянно обеспечивать усиление взаимосвязей различных наук. Некоторые исследова-

вательские технологии, такие как использование синхротронного излучения для изучения и разработки наноструктур, дадут новый импульс в развитии естествознания. На этой основе в институтах Российской академии наук, в других исследовательских организациях возможно формирование комплексных научных коллективов и центров, развивающих наносистемные подходы в таких областях науки как физика, химия, биология, материаловедение, математика и др. Динамика междисциплинарных исследований по наноструктурам усилит связи фундаментальной науки и высшего образования, преподавание естественных наук станет комплексным и более взаимосвязанным. Дальнейшее развитие работ в этой области потребует изменений в инфраструктуре высших учебных заведений и целенаправленной подготовки преподавателей в области нанотехнологий и наноматериалов, особенно при переходе к развитию основ будущей наноиндустрии в промышленности, медицине и оборонном комплексе.

5. Развитие инфраструктуры для реализации основ будущего нанотехнологий

Разработка и выпуск отечественного специального технологического, исследовательского и диагностического оборудования (установки для молекулярно-пучковой эпителии, сканирующие зондовые микроскопы и др.) для получения и характеристики наноструктур и наносистем — первоочередная задача развития практически любого направления в данной области.

Стремительное развитие и начало практического использования достижений в области наноматериалов и нанотехнологий за рубежом требует повышенного внимания и поддержки государства отечественным разработкам в этой области экономической деятельности, нуждающейся в координации и осуществлении определенного государственного регулирования в рамках научно-технологической и инновационной политики.

Развитие наносистемных исследований и разработок потребует поддержки бюджетных и внебюджетных фондов, работающих в научно-технической сфере. В Российском фонде фундаментальных исследований целесообразно формирование своеобразного "наносистемного" блока, в Российском фонде технологического развития в нормативном плане необходимо оптимизировать сроки возврата средств по проектам, формирующим основы наноиндустрии. Подключение Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере и Российского гуманитарного научного фонда в развитии работ по наносистемам должно способствовать проведению исследований

в области влияния наносистемных подходов на социальную структуру будущего общества.

В качестве стратегии инновационного развития основ наноиндустрии следует выбрать так называемую "стратегию наращивания", которая базируется на собственном научно-техническом и производственно-технологическом потенциале. При использовании научных результатов и производственного потенциала в рамках этой стратегии осваиваются высокие технологии и постепенно наращивается выпуск новой конкурентоспособной на внутреннем и внешнем рынке продукции. Учитывая неравнозначные стартовые условия и возможности развитых стран в формировании наноиндустриальных технологий, "стратегия наращивания" является наиболее предпочтительным путем проявления конкурентных преимуществ России в сфере применения наносистем в масштабах рынков наукоемкой продукции.

Серьезные требования в рамках упомянутой стратегии будут предъявлены к формирующейся сфере наукоемкой промышленности, основанной на нанотехнологиях, в части сроков освоения новых решений, защиты интеллектуальной собственности и разработки соответствующих наукоемких продуктов. Эта область знаний и технических приложений имеет существенные междисциплинарные аспекты, которые будет трудно координировать без стратегического плана исследований и разработок, инноваций в наноиндустрии и образовательного обеспечения с целью подготовки высококвалифицированных кадров.

Международное сотрудничество в сфере исследований и разработок наносистем должно обеспечивать интеграцию российских специалистов в единое информационное пространство и одновременно поддержку с участием государства ориентированных на экспорт проектов, программ освоения наукоемкой и высокотехнологичной продукции, закупок для развития экспортного производства оборудования и комплектующих. Это должно эффективно интегрировать нашу страну в систему

международного разделения труда с сохранением приоритета по выпуску конечной продукции на основе результатов развития нанотехнологий, создания наноматериалов и конструирования наносистем.

Заключение

Настоящая концепция и меры по ее реализации могут быть положены в основу разработки государственной технологической политики в области формирования основ нанотехнологий как вида экономической деятельности государственных и негосударственных научных и научно-производственных организаций с целью создания высокотехнологичных производств, опирающихся на полученные результаты исследований и разработок в области наносистем.

На основе формирующейся государственной технологической и инновационной политики необходимо создать в России условия для привлечения средств инвесторов к реализации проблемы создания наноматериалов и развития нанотехнологий. В проекте бюджета на 2004 г. эта проблема должна занять заметное место. Целесообразно провести слушания в комитетах Государственной Думы и Совета Федерации Федерального собрания РФ с целью формирования нормативно-правовой базы ускоренного развития нанотехнологий в России. Минпромнауки России совместно с другими министерствами и ведомствами, академиями наук, имеющими государственный статус, после соответствующей проработки с учетом возможностей увеличения расходов бюджета может выйти с инициативой об обеспечении финансирования инфраструктуры развития наносистем как обеспечивающего технологические прорывы научно-технического направления в соответствии с Основами политики Российской Федерации в области развития науки и технологий на период до 2010 года и дальнейшую перспективу, утвержденных Президентом Российской Федерации 30 марта 2002 года.

УДК 537.533.2

В. В. Левичев,
Г. А. Максимов, д-р хим. наук, проф.,
В. П. Мишкин,
Д. О. Филатов, канд. физ.-мат. наук,
 Научно-образовательный центр
 "Физика твердотельных наноструктур"
 Нижегородского государственного университета
 им. Н. И. Лобачевского

СОПОСТАВЛЕНИЕ ТОПОГРАФИИ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ

Методами ближнепольной сканирующей оптической микроскопии и атомно-силовой микроскопии исследовалась топография торцевой поверхности полупроводникового лазерного диода на основе InGaP/GaAs с двумя квантовыми ямами InGaAs и пространственное распределение интенсивности его излучения. Для выявления структуры лазерного диода применялся метод селективного химического травления.

Показана возможность привязки распределения излучения в ближнем поле к структуре активной области лазерного диода, в частности, определения пространственного расположения квантовых ям в волноводе относительно профиля моды излучения в ближнем оптическом поле.

Введение

Для исследования перспективных конструкций инжекционных лазеров на основе полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) необходимо определять распределение интенсивности излучения в волноводе лазерного диода (ЛД) и связывать его со структурой активного слоя ЛД. Метод ближнепольной сканирующей оптической микроскопии (БСМ) [1, 2] позволяет изучать пространственное распределение интенсивности излучения лазерного диода с разрешением до 50 нм, т. е. существенно превосходящим дифракционный предел разрешения обычного оптического микроскопа [3].

Ранее было показано [4], что метод атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сколе структур ЛД позволяет наблюдать топографию КЯ и волноводных слоев. Вместе с тем, несмотря на то, что метод БСМ позволяет регистрировать профиль моды излучения ЛД, нерешенной остается проблема пространственной привязки измеренного профиля интенсивности излучения к структуре ЛД, по-

скольку топографическое разрешение БСМ недостаточно для идентификации КЯ.

В описываемой работе мы применили селективное химическое травление для преобразования различий в химическом составе волноводных слоев и КЯ в InGaAs/GaAs/InGaAs структуре ЛД в поверхностный рельеф, достаточно развитый для обнаружения методом БСМ. Поскольку для удержания БСМ-зонда в области ближнего поля необходимо отслеживать топографию исследуемой поверхности, одновременно с получением БСМ-изображения возможно измерение топографии структуры полупроводникового лазера. В данной работе для удержания зонда в области ближнего поля использовался атомно-силовой сенсор сдвиговой силы, так что БСМ в то же время работал в режиме АСМ. С применением указанного метода одновременно с определением пространственного распределения излучения ЛД было получено топографическое изображение вытравленного волноводного слоя GaAs ограничивающих слоев InGaP. Это дало возможность сопоставить профиль структуры излучения с положением КЯ относительно границ волноводного слоя, определенным независимо методом АСМ.

Методика эксперимента

Лазерная гетероструктура на основе GaAs с ограничивающими волноводными слоями $\text{In}_{0,49}\text{Ga}_{0,51}\text{P}$ и двумя квантовыми ямами $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ толщиной 8 нм каждая была выращена методом газифазной МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении [5]. Схема гетероструктуры показана на рис. 1, а. Многомодовые ЛД с шириной полосы 100 мкм, изготовленные на основе данной структуры, имели длину волны излучения 1,03 мкм при 300 К. Просветляющее покрытие на переднюю грань ЛД не наносили, чтобы обеспечить возможность применения жидкостного химического травления.

Для выявления рельефа на излучающей грани ЛД использовали селективный травитель (0,8М

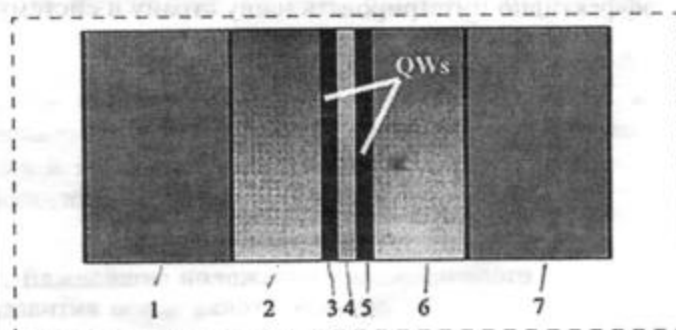


Рис. 1. Схематическое изображение структуры полупроводникового лазерного диода:

1, 7 — InGaP ограничивающие волноводные слои (500 нм); 2, 6 — GaAs волноводные слои (300 нм); 3, 5 — две квантовые ямы InGaAs (8 нм); 4 — GaAs спейсерный слой (80 нм) между КЯ

раствор $K_3[Fe(CN)_6]$ в 0,3М KOH): H_2O в смеси с глицерином в пропорции 1:1, имеющий высокую скорость травления для GaAs (~1 нм/мин) и низкую (менее 0,1 нм/мин) — для InGaP и InGaAs. Калибровку скорости травления проводили вытравливанием ступеньки в однородном эпитаксиальном слое, высоту ступеньки измеряли методом АСМ. ЛД погружали в травитель на 1 мин и затем ополаскивали в дистиллированной воде. Здесь следует отметить, что и после травления ЛД продолжали генерировать. Топографию поверхности травленых сколов ЛД структур измеряли на АСМ ТороMetrix Assigex в контактном режиме.

На рис 2, а, б представлены АСМ-изображение и профиль травленной передней грани ЛД, на которых наблюдаются все слои гетероструктуры, включая КЯ и спейсерный слой между ними. Сглаживание профиля можно объяснить краевыми эффектами травления, а также эффектом конволюции при АСМ-измерениях (использовались V-образные Si_3N_4 кантилеверы с пирамидальными зондами с радиусом закругления $R = 50$ нм и соотношением сторон 1:1). БСOM-измерения в режиме собирания излучения зондом ЛД были выполнены на установке ТороMetrix Auriga, оснащенной пьезокварцевым сенсором [7] собственной конструкции. Использовались специальные БСOM-зонды [8] на основе волоконных световодов для работы в ближнем ИК диапазоне на длине волны излучения ~1 мкм. БСOM-сигнал регистрировался Si фотодиодом с синхронным детектированием.

Необходимо подчеркнуть, что на БСOM-установке ТороMetrix Auriga одновременно с получением БСOM-изображения излучения полупроводникового лазера получалось АСМ-изображение

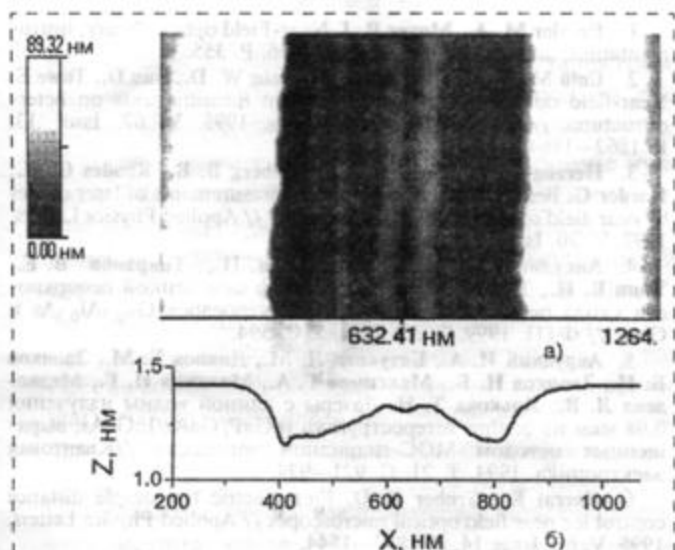


Рис. 2. АСМ-изображение (а) и профиль (б) травленной передней грани полупроводникового лазерного диода

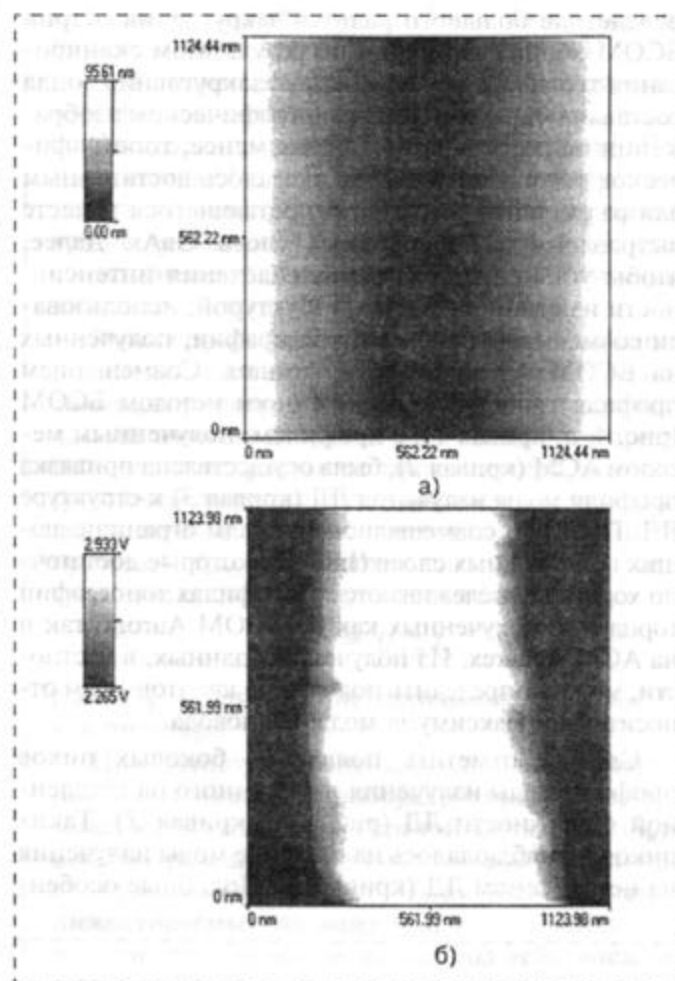


Рис. 3. Топография травленной передней грани полупроводникового лазерного диода (а) и пространственное распределение излучения полупроводникового лазерного диода в ближнем поле (б), полученные методом БСOM

топографии излучающей поверхности (рис. 3). Однако топографическое разрешение БСOM Auriga в АСМ-режиме было хуже, чем у стандартного АСМ Assigex, что вызвано меньшей чувствительностью использованного в БСOM Auriga пьезокварцевого сенсора сдвиговой силы по сравнению с оптико-механическим сенсором, используемым в АСМ Assigex, а также значительно большим радиусом закругления острия БСOM-зонда (~1 мкм), чем у стандартных АСМ-зондов (~50 нм). Указанное обстоятельство и вызвало необходимость применения селективного травления, чтобы создать на исследуемой поверхности рельеф, достаточный для обнаружения БСOM Auriga в АСМ-режиме.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены топография (а) и ближнепольное изображение (б) травленной передней грани ЛД. Неоднородность краев БСOM-изображения излучающей апертуры объясняется временной нестабильностью мощности излучения ЛД.

Вследствие большого радиуса закругления острия БСОН-зонда (из оценки по результатам сканирования тестового образца радиус закругления зонда составлял ~ 1 мкм) КЯ на топографическом изображении не разрешаются. Тем не менее, топографическое разрешение БСОН оказалось достаточным для разрешения углубления, остающегося в месте вытравленных волноводных слоев GaAs. Далее, чтобы установить связь распределения интенсивности излучения ЛД с его структурой, использовали совмещение профилей топографии, полученных на БСОН AuToGa и АСМ AccuGex. Совмещением профиля топографии, полученного методом БСОН (рис. 4, а, кривая 1), с профилем, полученным методом АСМ (кривая 2), была осуществлена привязка профиля моды излучения ЛД (кривая 3) к структуре ЛД. Профили совмещались по краям ограничивающих волноводных слоев (InGaP), которые достаточно хорошо прослеживаются в профилях топографии торца ЛД, полученных как на БСОН AuToGa, так и на АСМ AccuGex. Из полученных данных, в частности, можно определить положение квантовых ям относительно максимума моды волновода.

Следует отметить появление боковых пиков профиля моды излучения измеренного на травленной поверхности ЛД (рис. 4, а, кривая 3). Таких пиков не наблюдалось на профиле моды излучения на нетравленном ЛД (кривая 4). Подобные особен-

ности наблюдаются и на диаграмме направленности травленного и нетравленного ЛД в дальнем поле (рис. 4, б, кривые 1 и 2 соответственно). Это позволяет заключить, что боковые пики не связаны с артефактами БСОН-измерений, а обусловлены, по-видимому, дифракцией излучения на краях травленных InGaP волноводных слоев.

Заключение

Разработана методика, позволяющая сопоставить структуру излучающей поверхности полупроводникового лазерного диода на квантовых ямах и пространственный профиль интенсивности его излучения в ближнем поле. Применение ближнепольной сканирующей оптической микроскопии в сочетании с селективным химическим травлением дает возможность выявлять границы волноводного и ограничивающих слоев на топографическом изображении травленного торца лазерной структуры одновременно с пространственным распределением излучения полупроводникового лазерного диода. В свою очередь, это позволяет сопоставить профиль излучения в ближнем поле с положением квантовых ям относительно границ волноводного слоя, определенным независимо методом атомно-силовой микроскопии.

Данная работа выполнена при поддержке совместной Российско-американской программы "Фундаментальные исследования и высшее образование", Минобрнауки РФ и CRDF USA, (проект REC — 001). Авторы выражают благодарность Б. Н. Звонкову за предоставленные лазерные диоды и В. Ф. Дряхлушину за изготовление БСОН-зондов, В. А. Перевощикову за помощь в отработке методики селективного травления.

Список литературы

1. Paesler M. A., Moyer P. J. Near-Field optics: theory, instrumentation, and applications. Wiley, 1996. P. 355.
2. Ünlü M. S., Goldberg B. B., Herzog W. D., Sun D., Towe E. Near-field optical beam induced current measurements on heterostructures // Applied Physics Letters. 1995. V. 67. Issue 13. P. 1862—1864.
3. Herzog W. D., Ünlü M. S., Goldberg B. B., Rhodes G. H., Harder C. Beam divergence and waist measurements of laser diodes by near-field scanning optical microscopy // Applied Physics Letters. 1997. V. 70. Issue 6. P. 688—690.
4. Анкудинов А. В., Евтихеев В. П., Токранов В. Е., Улин В. П., Титков А. Н. Нанорельеф окисленной поверхности скола решетки чередующихся гетерослоев $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ и GaAs // ФТП. 1999. Т. 33. Вып. 5. С. 594.
5. Авруцкий И. А., Батукова Л. М., Дианов Е. М., Звонков Б. Н., Звонков Н. Б., Максимов Г. А., Малкина И. Г., Медведева Л. В., Янькова Т. Н. Лазеры с длиной волны излучения 0,98 мкм на основе гетероструктур InGaP/GaAs/InGaAs, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. С. 921—924.
6. Kartai K., Grober R. D. Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes // Applied Physics Letters. 1995. V. 66. Issue 14. P. 1842—1844.
7. Дряхлушин В. Ф., Климов А. Ю., Рогов В. В., Круглов А. В. Зонды для сканирующего ближнепольного оптического микроскопа // Поверхность. 2000. № 7. С. 40.

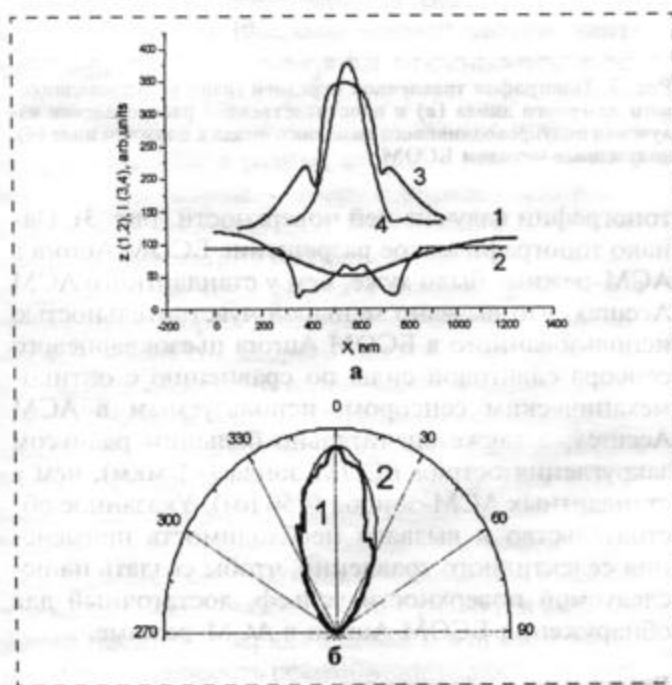


Рис. 4. Профили рельефа травленной поверхности (1, 2) и интенсивности излучения в ближнем поле (3, 4) полупроводникового лазерного диода (а) (1 — БСОН; 2 — АСМ; 3 — после селективного травления; 4 — до селективного травления); диаграммы направленности излучения (б) полупроводникового лазерного диода (1 — после селективного травления; 2 — до селективного травления)

УДК 531.31

В. В. Смирнов, канд. физ.-мат. наук,
О. А. Воробьев,
А. А. Митюрева, канд. физ.-мат. наук,
Т. Е. Примагина,
 Санкт-Петербургский государственный
 университет

АТОМНАЯ ГОЛОГРАФИЯ С ФОКУСИРОВКОЙ ИСТОЧНИКА НА АТОМНОЙ ЛИНЗЕ*

Приведены результаты теоретических исследований по изучению кроссоверов атомной линзы для атомных пучков и охарактеризованы возможности их использования в качестве источников освещения для корпускулярной осевой голографии. Показано, что разрешение в реконструированном образе — порядка диаметра кроссовера в фокусе атомной линзы, значение которого составляет доли ангстрема. Сопряженные образы не создают существенных помех наблюдению реконструированных образов.

Введение

Атомная оптика в настоящее время является интенсивно развиваемым направлением исследований, результаты которых применяются во многих областях, в том числе в микроскопии и литографии. Для формирования тонких кроссоверов атомных пучков используется фокусировка атомов на различных системах. Наибольшее разрешение (десятки нанометров) достигнуто при фокусировке на микролинзах, образованных стоячей световой волной [1]. Вместе с тем, существующие системы не позволяют приблизиться к атомному разрешению.

Значительного прогресса в достижении атомного разрешения можно ожидать при использовании предложений и развиваемой нами концепции атомной линзы в корпускулярной оптике [2–6]. Первоначально она была разработана для электронов в работе [2], где показано, что одиночные тяжелые атомы или колонки атомов в тонком кристалле (как, например, в экспериментах по канализированию) могут выступать в качестве линзы, способной сфокусировать пучок электронов в область с диаметром поперечного сечения в десятки пикометров. Кроссовер атомного фокуса является уникальным, самым тонким в природе зондом. Если его использовать как конечную линзу в элек-

тронном микроскопе, то в принципе возможно уменьшение предела разрешения до 0,05 нм и менее по сравнению с пределом разрешения 0,2 нм для лучших из доступных в настоящее время электронных микроскопов, работающих в той же области энергий 100...400 кэВ. Это было экспериментально продемонстрировано в работе [7] по визуализации кластеров вольфрама, где на стандартном электронном микроскопе с разрешением не выше 0,34 нм было получено разрешение 0,06 нм, что соответствует шестикратному увеличению разрешения.

Как показали проведенные нами исследования [6], определенные перспективы применения атомных линз для получения ультравысокого разрешения в электронной микроскопии могут быть связаны с использованием малых кроссоверов электронных пучков, формируемых атомными линзами, как источников для электронной голографии. Кроме электронной оптики в работах [4, 5] изучались различные типы атомно-линзовых систем для атомной оптики. Было показано, что для фокусирующих атомных линз сечение пучка в кроссовере может быть около 0,1...0,2 нм, что значительно (на порядки) меньше, чем для других линзовых систем атомной оптики, и является следствием размера атомных линз, несмотря на их сравнительно большие аберрации. Как и в случае электронов, тонкие кроссоверы атомных пучков, формируемых атомными линзами, можно использовать в качестве источников для атомной голографии. При этом в голографической микроскопии можно применять, как фокусирующие, так и дефокусирующие линзы с мнимым кроссовером. Последние в форме нанотверстий проще в реализации, так как не требуют приложения внешних полей. Было выявлено, что сечение пучка в кроссовере мнимого фокуса составляет порядка 30 пм.

В настоящей статье представлены результаты проведенных нами теоретических исследований по изучению кроссоверов атомной линзы для атомного и молекулярных пучков и рассмотрены возможности их использования в качестве источников освещения для корпускулярной осевой голографии.

Схема осевой корпускулярной голографии с освещением объекта от фокуса атомной линзы

Изучавшаяся схема осевой корпускулярной голографии выглядит следующим образом. Пучок частиц фокусируется атомной линзой. Волна, расходящаяся от фокуса, "освещает" объект и, доходя до плоскости регистрации, расположенной в дальней зоне дифракции, образует голограмму. В такой схеме может быть использован, как реальный, так и мнимый фокус от дефокусирующей линзы. В качестве атомной линзы для атомного пучка рассмат-

*Работа выполнена при финансовой поддержке подпрограммы "Электроника" научно-технической программы "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники" Министерства образования РФ (грант № 208.06.01.070).

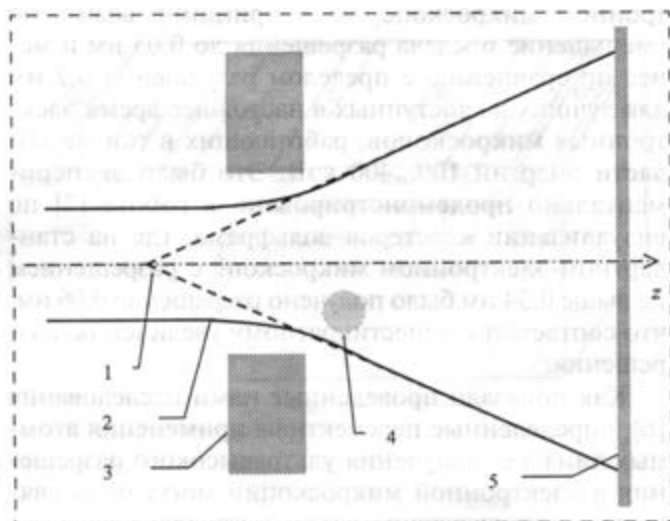


Рис. 1. Схема атомной голографии с атомно-сфокусированным источником:

1 — мнимый фокус; 2 — атомный пучок; 3 — атомная линза; 4 — объект; 5 — голограмма

ривалось наноотверстие в тонкой пленке. Соответствующие схемы голографии представлены на рис. 1.

Свойства реконструированного образа объекта в большой степени определяются свойствами кроссовера пучка в фокусе линзы. Так, разрешение при реконструкции без коррекции имеет значение порядка диаметра кроссовера в фокусе (при стабильности параметров схемы голографирования). Кроме того, можно дополнительно улучшить разрешение при коррекции, если известны свойства волны в области кроссовера. Для формирования голограммы также нужна определенная степень когерентности пучка частиц. Для атомных линз необходимая степень когерентности может быть достигнута при использовании атомных сверхзвуковых пучков. В проводимых нами работах рассматривались когерентные пучки.

Таким образом, первой задачей является анализ свойств кроссовера в фокусе атомной линзы.

Свойства кроссовера в фокусе дефокусирующей атомной линзы в виде наноотверстия для атомного пучка

Исследовались свойства мнимых кроссоверов дефокусирующих атомных линз в форме наноотверстий в тонкой пленке в отсутствие внешних полей для атомного пучка. Находили геометрические параметры мнимого кроссовера пучка и определяли их зависимость от энергии пучка атомов и характеристик атомной линзы.

Результаты получены при моделировании распространения атомного пучка через линзу в квантовом приближении. Как и в работе [5], квантовая

волна на выходе линзы находилась в эйкональном приближении. Ее можно записать в виде

$$\exp\left(-i \frac{m}{k} U(r)\right), \quad (1)$$

где $U(r) = \int_{-\infty}^{\infty} V(r, z) dz$ — так называемый проективный потенциал, зависящий от поперечных координат пучка — r ; z — координата вдоль пучка; V — потенциал взаимодействия атомов пучка с линзой; m — масса атома. Здесь используется атомная система единиц. Дальнейшая эволюция пучка описывается сверткой по поперечным координатам с вакуумным пропагатором:

$$p(r, z) = \frac{1}{i\lambda z} \exp\left(ik\left(z + \frac{r^2}{2z}\right)\right), \quad (2)$$

где λ — длина волны; k — волновое число.

Мнимый кроссовер получался путем применения пропагатора (2) в обратном направлении (изменение знака координаты вдоль оси z) с выключенной линзой.

Остановимся на выборе потенциала линзы. Предполагалось, что взаимодействие атома пучка с линзой является суммой парных Ван дер Ваальсовых взаимодействий с атомами, образующими линзу. Для ускорения вычислений использовалась интерполяция суммарного потенциала, для круглого наноотверстия — интерполяция радиальной зависимости проективного потенциала взаимодействия кубическим сплайном. Конкретные вычисления проводились для атомной линзы в форме наноотверстия в пленке Al_2O_3 толщиной 2,5 нм и пучка атомов ртути. Межатомные потенциалы находили на основе атомных поляризуемостей по данным справочника [8].

Вычисления проводили при нескольких диаметрах наноотверстий и значений энергии пучка. Рассматривали такие диаметры наноотверстий, для которых угловая апертура линзы равна порядка единицы. Ниже в таблице представлены найденные фокусные расстояния линзы F , определенные по положению пика интенсивности в мнимом кроссовере. Там же приведена оценка фокусного расстояния F' , рассчитанная по формуле

$$F' = \frac{2E}{d^2 U(0)/dr^2}. \quad (3)$$

Фокусное расстояние F немного короче, чем дает оценка по формуле (3). Это связано с тем, что проективный потенциал линзы идет круче параболического, для которого (3) дает точное значение. Фокусное расстояние линейно растет с энергией

Фокусное расстояние линзы F , оценка фокусного расстояния F^* по формуле (3) и диаметр пучка в мнимом кроссовере Δ в зависимости от радиуса линзы R и энергии атомного пучка E

E , мэВ	R , нм			
	1,4	1,6	1,8	2,0
30	-0,8	-1,5	-2,0	-3,1
	-1,0	-1,8	-2,5	-3,9
	0,02	0,03	0,03	0,04
60	-1,6	-2,8	-3,8	-5,9
	-2,1	-3,7	-5,0	-7,8
	0,025	0,03	0,03	0,04
100	-2,7	-4,6	-6,2	-9,4
	-3,4	-6,1	-8,4	-13,0
	0,03	0,04	0,04	0,05

Примечание. Первая цифра в графе — значение F , нм; вторая — F^* , нм; третья — Δ , нм.

пучка и быстро нарастает с увеличением диаметра наноотверстия.

В таблице приведены также соответствующие значения диаметра пучка в мнимом кроссовере Δ .

Свойства мнимого кроссовера в разных условиях схожи друг с другом. Типичный результат представлен на рис. 2, где изображено распределение интенсивности волны в мнимом кроссовере в плоскости оси линзы радиуса $R = 1,6$ нм при энергии пучка атомов $E = 60$ мэВ. Пик интенсивности соответствует фокусному расстоянию $F = -2,8$ нм. Усиление интенсивности в фокусе равно 400. Диаметр пучка в мнимом кроссовере составляет $\Delta = 30$ пм. Сравнение с оценкой диаметра по фор-

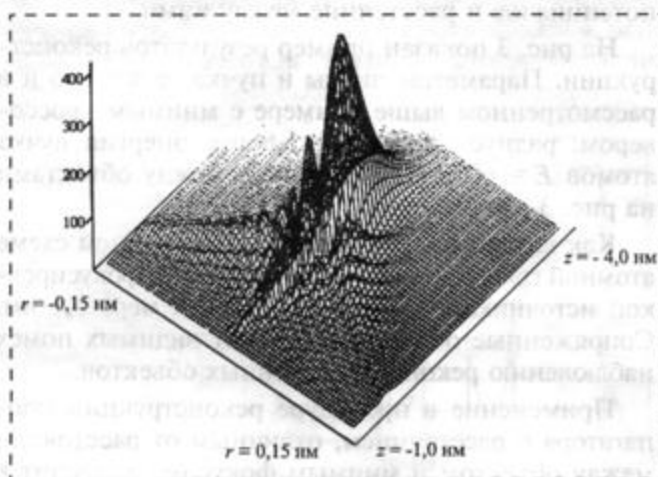


Рис. 2. Распределение интенсивности атомной волны в области мнимого фокуса дефокусирующей линзы радиуса $R = 1,6$ нм при энергии пучка атомов $E = 60$ мэВ

По вертикальной оси приведены значения относительной интенсивности (в произвольных единицах); (r, z) — координаты поперек и вдоль пучка. Положению центра линзы соответствуют координаты $(r, z) = (0, 0)$

муле линзы $\Delta = 0,61\lambda \frac{F}{R}$ ($\lambda = 8,3$ пм — длина волны пучка атомов ртути), которая дает значение $\Delta = 9$ пм, показывает, что aberrация для тяжелых атомов имеет в основном геометрический характер.

Моделирование осевой схемы корпускулярной голографии с атомно-линзовой фокусировкой источника

Процедура реконструкции. Схема корпускулярной голографии с атомно-линзовой фокусировкой источника представлена на рис. 1. Обозначим распределение волны в кроссовере в фокусе атомной линзы как f . Волна, прошедшая от фокуса до объекта расстояние z , имеет вид свертки f с вакуумным пропагатором (2):

$$w = p * f. \quad (4)$$

Для описания действия объекта на волну было использовано эйкональное приближение, которое сводится к ее умножению на амплитуду вида (1) с потенциалом, описывающим объект. Обозначив эту амплитуду t , получим волну в сечении пучка после прохождения объекта:

$$\psi = wt. \quad (5)$$

Голограмма расположена в дальней зоне дифракции волны от объекта, где интенсивность волны может быть записана как квадрат модуля преобразования Фурье (обозначенного тильдой) волны (5):

$$h = |\tilde{\psi}|^2. \quad (6)$$

Примем, что на голограмме регистрируется интенсивность волны (6).

Для реконструкции объекта из голограммы может быть использована процедура, предложенная в работе [6]. Она состоит из двух шагов: применения к голограмме преобразования Фурье и последующей свертки с вакуумным пропагатором (2), определяющим прохождение свободной волны от фокуса линзы до объекта.

Первый шаг приводит к автокорреляционной функции волны (5):

$$\tilde{h} = \psi^+ * \psi, \quad (7)$$

где знак "+" обозначает комплексное сопряжение с инверсией в поперечной плоскости $r \rightarrow -r$, относительно начала координат, расположенного на оси линзы.

На втором шаге в результате свертки автокорреляционной функции голограммы (7) с вакуумным пропагатором (2) получим

$$\tau = p * (w^+ t^+) * (wt). \quad (8)$$

Проанализируем полученное выражение (8). Обозначим $\Delta l = t - 1$ разность между амплитудой t в присутствии объекта и его отсутствии, когда $t = 1$. Очевидно, что для так называемых "слабых" объектов, когда мало значение фазы экспоненты в формуле (2), значение Δl равно фазе, т. е. пропорционально проективному потенциалу объекта. В общем случае именно Δl удобно рассматривать как исходный "образ" объекта. В терминах разностной амплитуды выражение (8) имеет вид суммы вкладов четырех членов

$$\tau = \tau_0 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3,$$

где $\tau_0 = p * w^+ * w$; $\tau_1 = p * w^+ * (w \Delta l)$;

$$\tau_2 = p * w * (w^+ \Delta l^+); \quad \tau_3 = p * (w^+ \Delta l^+) * (w \Delta l).$$

Учтем, что поскольку p^+ есть обратный пропагатор, то его свертка с пропагатором — δ -функция $p * p^+ = \delta$, которая при свертке с любой функцией последнюю не меняет. Таким образом, согласно (4), нулевой член τ_0 приводится к виду расфокусированной автокорреляционной функции распределения волны в фокусе линзы $\tau_0 = p * f^+ * f$. Для узких распределений f этот член дает почти равномерное распределение, мало влияющее на восстановленный образ τ .

Первый член приводится к виду свертки сопряженного распределения в фокусе линзы с образом объекта, промодулированным "освещающей" волной, пришедшей от фокуса линзы

$$\tau_1 = f^+ * (w \Delta l).$$

Именно данный член несет наименее искаженную информацию об объекте. Искажение сводится, во-первых, к модуляции образа "освещающей" волной и, во-вторых, к его уширению на значение сечения кроссовера в фокусе линзы. Если сечение кроссовера в фокусе линзы узкое, то эти искажения малы.

Второй член может быть представлен в виде

$$\tau_2 = p^2 * \tau_1^+.$$

Таким образом, он описывает вклад от сопряженного образа, расфокусированного на удвоенное расстояние от фокуса линзы до объекта. Расфокусированный сопряженный образ создает фон для наблюдения объекта.

Третий член является квадратичным по образу. Для "слабых" объектов он имеет второй порядок малости, и им можно пренебречь. В общем случае он может давать вклад в реконструированный образ и создавать фон для наблюдения объекта.

Таким образом, полный реконструированный образ τ имеет вид промодулированного "освещающей" волной и уширенного на значение сечения

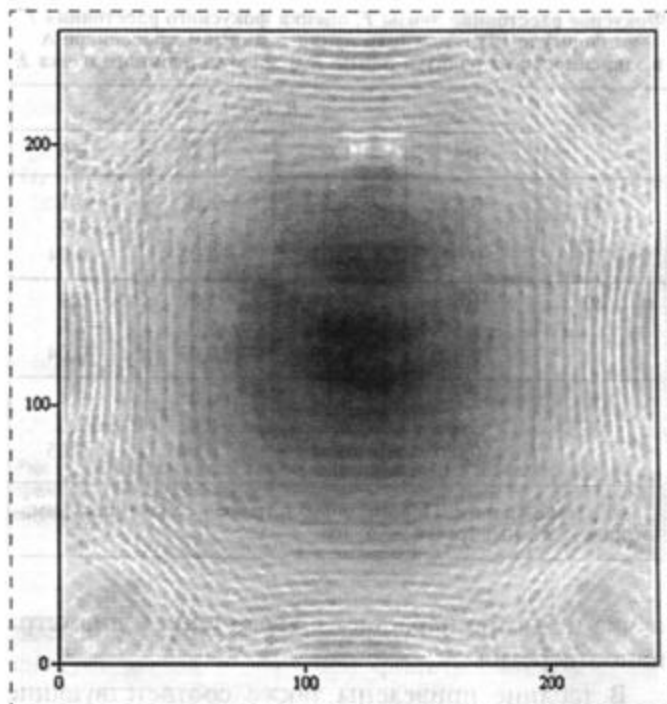


Рис. 3. Реконструкция из атомной голограммы двух объектов, расположенных на расстоянии 0,1 нм друг от друга

пучка в фокусе линзы исходного образа на фоне, создаваемом нулевым, вторым и третьим членами.

Вопрос о фактическом влиянии искажений и фона может быть исследован при моделировании.

Моделирование для атомной голографии. В качестве объекта использовались два модельных аксиально-симметричных проективных потенциала, определяющих функцию прохождения вида (1), для которых варьировались радиусы проективных потенциалов и расстояние между ними.

На рис. 3 показан пример результатов реконструкции. Параметры линзы и пучка те же, что и в рассмотренном выше примере с мнимым кроссовером: радиус линзы $R = 1,6$ нм, энергия пучка атомов $E = 60$ мэВ. Расстояние между объектами на рис. 3 равно 0,1 нм.

Как видно, разрешение в рассмотренной схеме атомной голографии с атомно-линзовой фокусировкой источника достигает по крайней мере 0,1 нм. Сопряженные образы не создают видимых помех наблюдению реконструированных объектов.

Применение в процедуре реконструкции пропагатора с расстоянием, отличным от расстояния между объектом и мнимым фокусом, приводит к искажению образа.

Заключение

Проведенные исследования показали, что для изучавшейся конфигурации атомной линзы диа-

метр атомного пучка в фокусе линзы равен порядка десятков пикометров.

Атомная линза в виде наноотверстия в тонкой пленке имеет самое высокое качество из исследованных нами ранее атомных линз для атомных пучков. Для тяжелых атомов диаметр пучка в фокусе линзы определяется в основном геометрическими aberrациями. Усиление интенсивности в минимуме фокусе составляет несколько сотен раз.

Интересно отметить, что диаметр кроссовера в фокусе атомной линзы для атомных пучков получается меньше диаметра атома. Под диаметром кроссовера следует понимать точность, с которой центры масс атомов выстроены друг за другом в фокусе атомной линзы.

Моделирование осевой схемы корпускулярной голографии с использованием атомной линзы для освещения объекта показало, что разрешение в реконструированном образе — порядка диаметра кроссовера линзы. При этом сопряженные образы

не создают существенных помех наблюдению реконструированных образов.

Список литературы

1. Schulze Th., Brezger B., Mertens R., Pivk M., Pfau T., Mlynek J. Writing a superlattice with light forces // Appl. Phys. 2000. B. 70. P. 671–674.
2. Smirnov V. V. Atomic focusers // J. Phys. D. 1998. V. 31. N 13. P. 1548–1555.
3. Cowley J. M., Spence J. C. H., Smirnov V. V. The enhancement of electron microscope resolution by use of atomic focusers // Ultramicroscopy. 1997. V. 68. P. 135–148.
4. Смирнов В. В. Фокусировка атомных и молекулярных пучков в электрических полях некоторых конфигураций // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 7. С. 92–97.
5. Mityureva A. A., Smirnov V. V., Vorobiev O. A. A nanohole as an atomic lens for atoms and molecules // J. Phys. D. 2001. V. 34. N 13. P. L65–L69.
6. Smirnov V. V., Cowley J. M. In-line electron holography with an atomic-focuser source // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. N 6. 064109(9).
7. Cowley J. M. Electron holography with atomic focusers // Phys. Rev. Letters. 2000. V. 84. N 16. P. 3618–3621.
8. Радиг А. А., Смирнов В. В. Справочник по атомной и молекулярной физике. М.: Атомиздат. 1980. 240 с.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.391

Д. А. Усанов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
А. В. Скрипаль, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Саратовский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского
e-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

ДИАГНОСТИКА НАНОВИБРАЦИЙ И МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ И БИООБЪЕКТОВ

Показана возможность измерения нанометровых вибраций и перемещений с применением в качестве измерительной системы полупроводникового лазера, работающего в режиме автодинного детектирования. Разработана методика диагностики вибраций и перемещений отдельных органов биологических объектов с использованием лазерной автодинной системы. В качестве примера приведены результаты регистрации микродвижений глаза и сердца пресноводного рачка — дафнии.

Введение

К перспективным научным направлениям микросистемной техники можно отнести исследования по проблеме разработки и создания диагно-

стических процедур для контроля микро-, нановибраций и перемещений. Создание диагностических систем нового поколения может базироваться на физических явлениях, использование которых позволяет разрабатывать устройства, допускающие совмещение различных функций, в частности, функции генерации и детектирования. К таким явлениям относится эффект автодинного детектирования в полупроводниковых лазерных структурах [1–3].

Полупроводниковые лазерные структуры, работающие в режиме автодинного детектирования, могут быть использованы для контроля параметров нанометровых вибраций при разработке современных микросистем и нанотехнологий, при исследовании колебательных процессов биобъектов [4–6].

Возможность использования полупроводниковых лазеров, работающих в ИК диапазоне длин волн, для измерений характеристик вибраций с малыми амплитудами была описана, например, в [4, 5, 7]. В измерительных системах такого типа для наведения лазерного луча в заданную точку объекта требовалось устройство для визуализации ИК излучения, что существенно усложняло устройство таких систем. Такого рода сложность естественным образом устраняется, если в качестве источника излучения использовать лазерный диод

метр атомного пучка в фокусе линзы равен порядка десятков пикометров.

Атомная линза в виде нанотверстия в тонкой пленке имеет самое высокое качество из исследованных нами ранее атомных линз для атомных пучков. Для тяжелых атомов диаметр пучка в фокусе линзы определяется в основном геометрическими aberrациями. Усиление интенсивности в минимуме фокусе составляет несколько сотен раз.

Интересно отметить, что диаметр кроссовера в фокусе атомной линзы для атомных пучков получается меньше диаметра атома. Под диаметром кроссовера следует понимать точность, с которой центры масс атомов выстроены друг за другом в фокусе атомной линзы.

Моделирование осевой схемы корпускулярной голографии с использованием атомной линзы для освещения объекта показало, что разрешение в реконструированном образе — порядка диаметра кроссовера линзы. При этом сопряженные образы

не создают существенных помех наблюдению реконструированных образов.

Список литературы

1. Schulze Th., Brezger B., Mertens R., Pivk M., Pfau T., Mlynek J. Writing a superlattice with light forces // Appl. Phys. 2000. B. 70. P. 671–674.
2. Smirnov V. V. Atomic focusers // J. Phys. D. 1998. V. 31. N 13. P. 1548–1555.
3. Cowley J. M., Spence J. C. H., Smirnov V. V. The enhancement of electron microscope resolution by use of atomic focusers // Ultramicroscopy. 1997. V. 68. P. 135–148.
4. Смирнов В. В. Фокусировка атомных и молекулярных пучков в электрических полях некоторых конфигураций // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 7. С. 92–97.
5. Mityureva A. A., Smirnov V. V., Vorobiev O. A. A nanohole as an atomic lens for atoms and molecules // J. Phys. D. 2001. V. 34. N 13. P. L65–L69.
6. Smirnov V. V., Cowley J. M. In-line electron holography with an atomic-focuser source // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. N 6. 064109(9).
7. Cowley J. M. Electron holography with atomic focusers // Phys. Rev. Letters. 2000. V. 84. N 16. P. 3618–3621.
8. Радиг А. А., Смирнов В. В. Справочник по атомной и молекулярной физике. М.: Атомиздат. 1980. 240 с.

Молекулярная электроника и биоэлектроника

УДК 621.391

Д. А. Усанов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
А. В. Скрипаль, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Саратовский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского
e-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

ДИАГНОСТИКА НАНОВИБРАЦИЙ И МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ И БИООБЪЕКТОВ

Показана возможность измерения нанометровых вибраций и перемещений с применением в качестве измерительной системы полупроводникового лазера, работающего в режиме автодинного детектирования. Разработана методика диагностики вибраций и перемещений отдельных органов биологических объектов с использованием лазерной автодинной системы. В качестве примера приведены результаты регистрации микродвижений глаза и сердца пресноводного рачка — дафнии.

Введение

К перспективным научным направлениям микросистемной техники можно отнести исследования по проблеме разработки и создания диагно-

стических процедур для контроля микро-, нановибраций и перемещений. Создание диагностических систем нового поколения может базироваться на физических явлениях, использование которых позволяет разрабатывать устройства, допускающие совмещение различных функций, в частности, функции генерации и детектирования. К таким явлениям относится эффект автодинного детектирования в полупроводниковых лазерных структурах [1–3].

Полупроводниковые лазерные структуры, работающие в режиме автодинного детектирования, могут быть использованы для контроля параметров нанометровых вибраций при разработке современных микросистем и нанотехнологий, при исследовании колебательных процессов биобъектов [4–6].

Возможность использования полупроводниковых лазеров, работающих в ИК диапазоне длин волн, для измерений характеристик вибраций с малыми амплитудами была описана, например, в [4, 5, 7]. В измерительных системах такого типа для наведения лазерного луча в заданную точку объекта требовалось устройство для визуализации ИК излучения, что существенно усложняло устройство таких систем. Такого рода сложность естественным образом устраняется, если в качестве источника излучения использовать лазерный диод

на квантоворазмерных структурах, работающих в видимой части спектра [8–11]. Эта возможность описана в работе [12], авторы которой использовали в экспериментах лазерный диод на структурах InGaAlP (SDL-7311-GI).

Нами были проведены экспериментальные исследования возможности измерения предельно малых амплитуд вибраций при использовании лазерного диода типа RLD-650 на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой с характеристиками: мощность излучения 5 мВт, длина волны 652 нм, пороговый ток 20 мА. Отметим, что меньшая длина волны у лазеров, работающих в видимом диапазоне, по сравнению с лазерами, работающими в ИК диапазоне (1300 нм), позволяет рассчитывать на возможность уменьшения нижнего порога измеряемых амплитуд вибраций при использовании методов, описанных в [4, 5, 7, 12].

Автодинный сигнал полупроводникового лазера

Использование эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых лазерах для создания на их основе простых измерительных датчиков с высокой чувствительностью к отраженному сигналу представляется весьма привлекательным [13–15]. Однако в таких измерительных датчиках вследствие влияния внешней оптической обратной связи автодинный сигнал может сильно отличаться от интерференционного сигнала лазерной системы с развязкой от источника излучения, что будет затруднять применение хорошо разработанной теории гомодинной интерферометрии. Можно определить условия, при которых внешняя оптическая обратная связь в полупроводниковом лазере, работающем в автодинном режиме, наименьшим образом искажает интерференционный сигнал лазерной системы с развязкой от источника излучения.

Переменная нормированная составляющая автодинного сигнала записывается в виде [16]

$$P = \cos(\omega(t)\tau(t)). \quad (1)$$

Здесь $\tau(t)$ — время обхода лазерным излучением расстояния L до внешнего отражателя, изменяющееся при изменении расстояния до отражателя со временем t ; $\omega(t)$ — частота излучения полупроводникового лазера, определяемая уравнением [3]

$$\omega_0\tau = \omega\tau + C \sin(\omega\tau + \arctg\alpha), \quad (2)$$

где $C = \tau z \sqrt{1 + \alpha^2}$ — коэффициент, характеризующий уровень внешней оптической обратной связи; $\omega\tau$ — набег фазы волны во внешнем резонаторе для лазера с обратной связью; ω_0 — резонансная частота собственного резонатора лазерного диода без обратной связи; α — коэффициент уширения ли-

нии генерации; z — коэффициент обратной связи, который может быть представлен в виде

$$z = \frac{(1 - R^2)(r/R)}{\tau_{in}}. \quad (3)$$

Здесь r и R — соответственно коэффициенты отражения по амплитуде от внешнего отражателя и обращенной к нему грани лазера; τ_{in} — время обхода излучением диодного резонатора, определяемое формулой

$$\tau_{in} = \frac{2L_d}{c\eta},$$

где L_d и η — соответственно длина и показатель преломления активной области полупроводникового лазера; c — скорость света.

Как следует из уравнения (2), при малом уровне обратной связи, характеризуемом значением $C \ll 1$, зависимость фазы излучения лазерного диода $\omega_0\tau$ от набег волны во внешнем резонаторе лазера с обратной связью $\omega\tau$ становится линейной. Иными словами, при $C \ll 1$ изменением частоты излучения полупроводникового лазера от времени можно пренебречь, и соотношение (1) запишем в виде

$$P = \cos(\omega_0\tau(t)).$$

Последнее выражение для автодинного сигнала совпадает с интерференционным сигналом лазерной системы с развязкой от источника излучения.

Автодинный сигнал при гармонических вибрациях отражателя

В случае колебаний объекта по гармоническому закону время обхода лазерным излучением внешнего резонатора изменяется по закону

$$\tau(t) = \tau_0 + \tau_a \sin(\Omega t + \varepsilon), \quad (4)$$

где τ_0 — время обхода лазерным излучением внешнего резонатора с неподвижным отражателем; $\tau_a = 2\xi/c$ — амплитудное значение переменной составляющей времени обхода лазерным излучением внешнего резонатора; ξ и Ω — амплитуда и частота колебаний отражателя лазерного излучения; ε — начальная фаза.

Преобразуя соотношение (4) в выражение для фазы, можно записать

$$\omega(t)\tau(t) = \omega_0\tau(t) = \omega_0\tau_0 + \omega_0\tau_a \sin(\Omega t + \varepsilon). \quad (5)$$

С учетом (5) соотношение (1) для нормированной переменной составляющей автодинного сигнала запишется в виде

$$P(t) = \cos(\theta + f(t)), \quad (6)$$

где $\theta = \omega_0\tau_0$ — стационарный набег фазы; $f(t) = \omega_0\tau_a \sin(\Omega t + \varepsilon)$ — функция, характеризующая про-

дольные движения объекта; $\sigma = 2\omega_0\xi/c$. При малом уровне обратной связи, когда $C \ll 1$, нормированная составляющая автодинного сигнала совпадает с нормированной составляющей интерференционного сигнала [17].

Метод нанометровых вибраций

В системе, для которой автодинный сигнал совпадает с интерференционным сигналом лазерной системы с развязкой от источника, зависимость интенсивности интерференционного сигнала от времени имеет вид негармонической функции даже в случае гармонически колеблющегося объекта при условии, что амплитуда колеблющегося объекта соизмерима с длиной волны лазерного излучения. Мощность излучения $P(t)$ продетектированного сигнала в интерференционной системе, одно из плеч которой совершает гармонические колебания, может быть представлена в виде разложения в ряд по функциям Бесселя [18]:

$$P(t) = \cos\theta J_0(\sigma) + 2\cos\theta \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\sigma) \cos[2n\Omega t + \varepsilon] - 2\sin\theta \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\sigma) \sin[(2n-1)\Omega t + \varepsilon], \quad (7)$$

где J_n — функция Бесселя порядка n ; n — номер гармоники спектральной составляющей выходного сигнала детектора.

Как видно из выражения (7), продетектированный сигнал состоит из постоянной компоненты $\cos\theta J_0(\sigma)$, гармоники на основной частоте и более высоких гармоник основной частоты.

Для гармонически колеблющегося объекта амплитуды спектральных составляющих выходного сигнала детектора автодинной системы прямо пропорциональны функциям Бесселя $J_{2n}(\sigma)$ и $J_{2n-1}(\sigma)$ и связаны с ними соотношениями

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= 2J_1(\sigma)\sin\theta; \\ S_2 &= 2J_2(\sigma)\cos\theta; \\ S_{2n-1} &= 2J_{2n-1}(\sigma)\sin\theta; \\ S_{2n} &= 2J_{2n}(\sigma)\cos\theta. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

С ростом амплитуды колебаний объекта ξ наблюдается обогащение спектра продетектированного сигнала, причем индекс n у гармоники с максимальной амплитудой $S_{\max}$ сдвигается в сторону больших значений [19]. В диапазоне амплитуд вибраций от 0 до $\sim 0,23\lambda$ максимальное значение в спектре продетектированного сигнала имеет гармоника, совпадающая с частотой колебаний исследуемого объекта ($n = 1$); от $\sim 0,23\lambda$ до $\sim 0,44\lambda$ максимальное значение в спектре продетектированно-

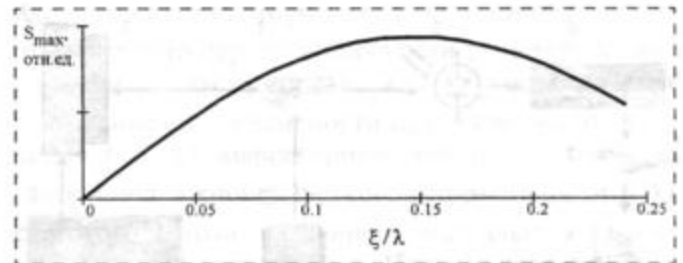


Рис. 1. Зависимость амплитуды гармоники $S_{\max}$, имеющей максимальное значение в спектре продетектированного сигнала, от амплитуды колебаний объекта ξ , нормированной на длину волны лазерного излучения

го сигнала имеет вторая гармоника ($n = 2$) и т. д. На рис. 1 приведена зависимость амплитуды гармоники $S_{\max}$, совпадающей с частотой колебаний исследуемого объекта ($n = 1$), от амплитуды колебаний объекта ξ , нормированной на длину волны лазерного излучения.

Для определения искомой амплитуды колебания объекта может быть использовано следующее из (8) соотношение амплитуд спектральных составляющих выходного сигнала детектора автодинной системы:

$$\frac{S_x}{S_n} = \frac{J_1\left(\frac{4\pi\xi_x}{\lambda}\right)}{J_n\left(\frac{4\pi\xi}{\lambda}\right)}, \quad (9)$$

где S_x — амплитуда спектральной гармоники, совпадающей с частотой колебаний исследуемого объекта с искомой амплитудой колебаний ξ_x ; S_n — амплитуда n -й спектральной гармоники для известной амплитуды колебаний ξ , в качестве которой может быть использовано экспериментально определенное значение первой спектральной гармоники в максимуме $S_{1\max}$ (см. рис. 1). $S_{1\max}$ соответствует значению $\xi = 0,16\lambda$ (104 нм для $\lambda = 0,652$ мкм). При известном из измерений отношении $S_x/S_{1\max}$ амплитуда колебаний ξ вычисляется по соотношению (9) или определяется по графику (рис. 1).

Измерительная система

На рис. 2 приведена схема автодинной измерительной системы на полупроводниковом лазере. В качестве источника полупроводникового автодина использовался лазерный диод RLD-650(5). Излучение полупроводникового лазера 1, запитываемого от источника тока 2, направлялось на отражатель 3, закрепленный на пьезокерамике из BaTiO_3 , колебания которой возбуждались генератором звуковых колебаний 9. Часть излучения, отраженного от объекта, возвращалась в резонатор полупроводникового лазера, изменение выходной

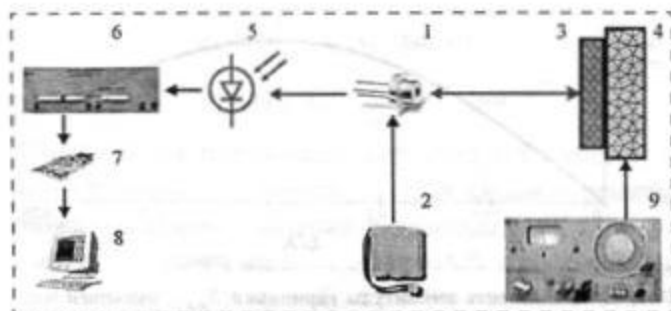


Рис. 2. Схема автодинной измерительной системы на полупроводниковом лазере:

1 — полупроводниковый лазер; 2 — источник тока; 3 — отражатель; 4 — пьезокерамика; 5 — фотодетектор; 6 — усилитель с фильтром; 7 — аналого-цифровой преобразователь; 8 — компьютер; 9 — генератор звуковых колебаний

мощности которого регистрировалось фотодетектором 5. Оптическая часть установки размещалась на виброизолирующем основании, обеспечивающем гашение колебаний от внешних источников на частотах, превышающих 5 Гц. Сигнал с фотодетектора поступал через широкополосный усилитель 6, содержащий фильтр переменного сигнала, на вход аналого-цифрового преобразователя 7 компьютера 8.

Результаты обработки автодинного сигнала нановибраций

На рис. 3 и 4 приведены измеренный продетектированный фотоприемником сигнал и спектральный ряд для искомой (неизвестной) амплитуды колеблющегося объекта. По спектру, приведенному на рис. 4, была определена амплитуда гармоники спектрального ряда на частоте колебаний объекта ($n = 1$), которая составила $S_x = 0,449$ отн. ед.

Для получения абсолютного значения амплитуды колебаний ξ объект подвергали дополнительному воздействию механических вибраций на частоте, равной частоте колебаний исследуемого вибрирующего объекта. Плавно увеличивая амплитуду дополнительных механических вибраций, по достижении гармоникой спектрального ряда на частоте колебаний объекта S_1 максимального значения $S_{1\max}$ фиксировали его.

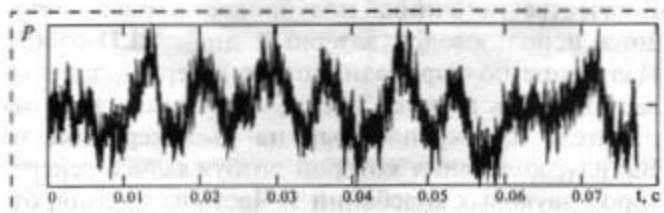


Рис. 3. Измеренный автодинный сигнал для нанометровых амплитуд вибраций объекта

По значению амплитуды дополнительных колебаний объекта в максимуме зависимости, приведенной на рис. 1, равному $\xi = 104$ нм ($\xi/\lambda = 0,16$), с использованием соотношения (9) была определена искомая амплитуда колебаний объекта, которая в рассматриваемом случае оказалась равной $\xi_x = 1,2$ нм. Проведение измерений амплитуд меньших значений ограничивалось шумами установки, представленной на рис. 2. Было показано, что предложенная автодинная измерительная система на полупроводниковом лазере позволяет контролировать амплитуду вибраций объекта в диапазоне $1 \cdot 10^{-3} - 10$ мкм в полосе частот от единиц герц до сотен мегагерц.

Диагностика биологических объектов

Разработанные нанотехнологии измерений нановибраций и перемещений были применены для диагностики движения отдельных органов биологических объектов, в частности, сердца и глаза пресноводного рачка — дафнии, используемого в экологическом мониторинге в качестве тест-объекта [20–22].

С помощью описанного способа проведены экспериментальные исследования колебательных движений различных органов дафнии. Амплитуда и частота сердцебиений дафнии определялись аналогично тому, как это было описано в [5]. На рис. 5 приведены осциллограммы движений глаза дафнии и их спектры, полученные для случая собственных движений глаза (рис. 5, а) и при возникновении явления синхронизации этих движений внешним электрическим полем (рис. 5, б). Как видно на рис. 5, а, в спектре сигнала выделяются гармоники с частотами 4,5; 9; 13 и 18 Гц, причем максимальной амплитудой обладает гармоника с частотой 13 Гц. При возникновении явления синхронизации, как видно на рис. 5, б, характер движения глаза становится близким к гармоническому (с частотой синхросигнала равной 8 Гц) с небольшой модуляционной составляющей, обусловленной, по-видимому, тремором.

Полупроводниковый лазерный автодин, обладающий высокой чувствительностью и возможностью реализации фазового метода измерений при

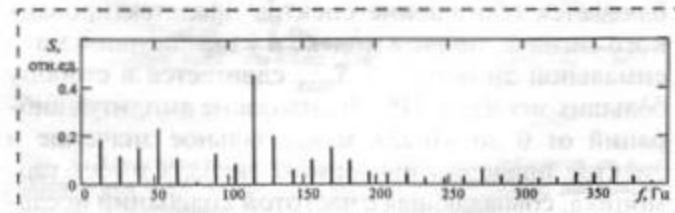


Рис. 4. Спектральное представление нанометровых амплитуд вибраций объекта

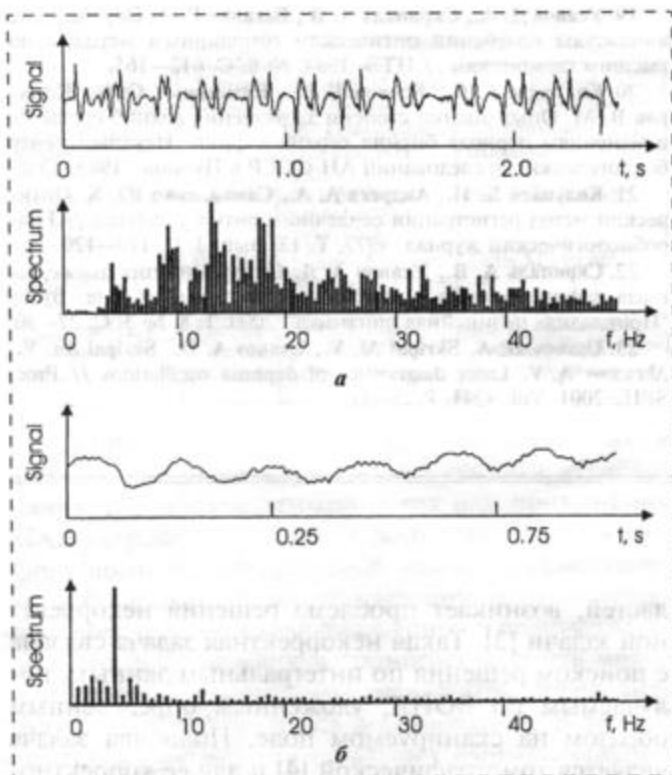


Рис. 5. Осциллограммы движений глаза дафнии и их спектры, полученные для случая собственных движений глаза (а) и при возникновении явления синхронизации этих движений внешним электрическим полем (б)

конструктивной простоте и пониженных требованиях к механической стабильности регистрирующей системы, использовался для увеличения числа информативных параметров, характеризующих поведение дафний в токсичной среде. С помощью лазерной автодиной системы регистрировались амплитуда и форма протектированного сигнала, по характеру которых определялась степень токсичности водной среды. Частота сердцебиения дафнии определялась по основной частоте гармоники спектра протектированного сигнала, а амплитуда колебаний — по набору спектральных гармоник [23].

Рассчитанная по результатам измерений протектированного сигнала зависимость мгновенных значений смещения сердца дафнии от времени

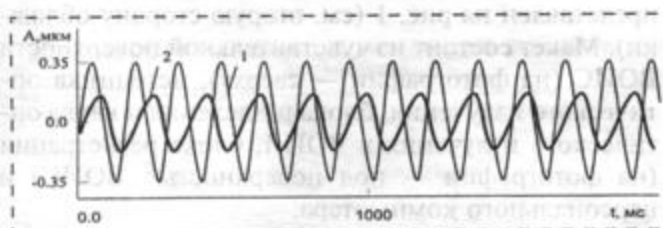


Рис. 6. Восстановленная форма биений сердца дафнии: 1 — при отсутствии токсикантов в водной среде; 2 — при наличии фенола в водной среде (концентрация 5 мг/л)

приведена на рис. 6. Согласно результатам проведенных исследований при наличии фенола в водной среде амплитуда биений сердца дафнии составила 0,2 мкм, что существенно меньше амплитуды биений сердца дафнии в отсутствии фенола (0,35 мкм).

Проведенные исследования показали возможность использования лазерных автодиных технологий для контроля нано- и микродвижений отдельных органов биологических объектов в целях экологического мониторинга и оценки степени загрязнения окружающей среды.

Работа выполнена при поддержке научно-технической программой "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники", подпрограмма 208 "Электроника", код НИР 03.01.006.

Список литературы

1. Usanov D. A., Skripal A. V., Skripal A. N., Abramov A. V., Kletsov A. A. Nonlinear dynamics of semiconductor microwave and optical oscillators // *Izv. VUZ "Applied Nonlinear Dynamics"* (Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика). 2002. Vol. 10. N 3. P. 159—171.
2. Shunc N., Petermann K. Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor lasers with external feedback // *IEEE J. Quantum Electron.* 1988. Vol. 24. P. 1242—1247.
3. Tromborg B., Osmundsen J. H., Olesen H. Stability analysis for a semiconductor laser in an external cavity // *IEEE J. Quantum Electron.* 1984. Vol. QE-20. P. 1023—1032.
4. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Калинин М. Ю. Восстановление формы сложного движения объекта по сигналу автодиного детектирования полупроводникового лазера // *ЖТФ*. 2000. Т. 70. Вып. 2. С. 125—129.
5. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Вагарян А. Ю. и др. Лазерная автодиная интерферометрия динамических параметров биообъектов // *Письма в ЖТФ*. 1998. Т. 24. Вып. 5. С. 39—43.
6. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Калинин М. Ю. Формирование автодиного сигнала в полупроводниковом лазере при движении внешнего отражателя // *Изв. Вузов "Прикладная нелинейная динамика"*. 1998. Т. 6. № 1. С. 3—9.
7. Donati S., Giuliani G., Merlo S. Laser diode feedback interferometer for measurements of displacements without ambiguity // *IEEE J. Quantum Electron.* 1995. Vol. 31. N 1. P. 113—119.
8. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // *Физика и техника полупроводников*, 1998. Т. 32. № 1. С. 3—18.
9. Леденцов Н. Н., Устинов В. М., Шукин В. А. и др. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры // *Физика и техника полупроводников*, 1998. Т. 32. № 4. С. 385—410.
10. Жуков А. Е., Кош А. Р., Устинов В. М. и др. Характеристики усиления инжекционных лазеров на квантовых точках // *ФТП*. 1999. Т. 33. Вып. 9. С. 1111—1114.
11. Быковский Ю. А., Дедушенко К. Б., Зверьков М. В., Мамаев А. Н. Инжекционный квантоворазмерный лазер с внешней оптической обратной связью // *Квантовая электроника*. 1992. Т. 19. № 7. С. 657—661.
12. Merlo S., Donati S. Reconstruction of displacement waveforms with a single channel laser diode feedback interferometer // *IEEE J. Quantum Electron.* 1995. Vol. 33. N 4. P. 527—531.
13. Koelnic M. H. Direct-contact and self-mixing laser Doppler blood flow velocimetry // *Ph. D. Thesis, Twenty University of Technology, Enschede*. 1993. P. 240.

14. Потапов В. Т., Мамедов А. М., Шаталин С. В., Юшайтис Р. В. Автодинные мультиплексные волоконно-оптические датчики // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. № 9. С. 903–912.
15. Tavrov A. V., Mishalevsky I. V., Ublinsky D. V. Noncontact interferometric measurement of vibration parameters under diffuse light reflection // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3173. P. 295–297.
16. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Калинин М. Ю. О причине размытия отдельных участков фазового портрета автодинного сигнала полупроводникового лазера при движении внешнего отражателя // Изв. Вузов "Прикладная нелинейная динамика". 2000. Т. 6. № 1. С. 15–20.
17. Usanov D. A., Skripal A. V. Determination of complex motion form by autodyne detection signal of semiconductor laser // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4827. P. 385–393.
18. Коронкевич В. П., Соболев В. С., Дубинцев Ю. Н. Лазерная интерферометрия. Новосибирск: Наука. 1983. 212 с.

19. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Вагарин В. А. Определение амплитуды колебаний оптическим гомодинным методом по высшим гармоникам // ПТЭ. 1994. № 6. С. 612–615.
20. Кикиндзе Г. С., Есаков Б. П., Кузьминых С. Б., Комаров В. М. Опыт оценки степени загрязнения водной среды по изменениям периода биения сердца дафний. Научный центр биологических исследований АН СССР в Пушкине, 1983. 13 с.
21. Колупаев Б. И., Андреев А. А., Самойленко Ю. К. Оптический метод регистрации сердечного ритма у дафний // Гидробиологический журнал. 1977. Т. 13. Вып. 3. С. 119–120.
22. Скрипаль А. В., Усанов А. Д. Синхронизация движений глаза дафнии внешним электрическим полем // Изв. Вузов "Прикладная нелинейная динамика". 2000. Т. 8. № 3. С. 27–30.
23. Usanov D. A., Skripal A. V., Usanov A. D., Skripal A. V., Abramov A. V. Laser diagnostics of daphnia oscillations // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4241. P. 25–31.

УДК 621.373.826:315.61

Ю. Н. Кульчин, д-р физ.-мат. наук,
И. В. Денисов, канд. физ.-мат. наук,
О. В. Кириченко, канд. физ.-мат. наук,
Е. В. Денисова, канд. физ.-мат. наук,
В. А. Седов, Р. С. Дроздов,
Дальневосточный государственный технический
университет, г. Владивосток

МАКЕТ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ НЕЙРОПОДОБНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Описывается макет оптоэлектронной нейроподобной измерительной системы, являющейся базовым элементом для создания нового класса адаптивных оптоэлектронных контрольно-измерительных устройств. Система позволяет восстанавливать пространственную структуру распределений физических полей, осуществлять диагностику состояния и охрану технических и технологических объектов.

Введение

Для мониторинга состояния физических полей и технических объектов, действующих на протяженных исследуемых областях, широкие возможности открывает использование волоконно-оптических измерительных систем на основе распределенных волоконно-оптических измерительных сетей (ВОИС) [1, 2]. Поступающие по волоконно-оптическим измерительным линиям (ВОИЛ) измерительных сетей оптические сигналы изменяются пропорционально значению внешнего физического воздействия и формируют массивы данных о параметрах исследуемых физических полей и их пространственном распределении. В связи с тем, что число ВОИЛ меньше числа исследуемых об-

ластей, возникает проблема решения некорректной задачи [3]. Такая некорректная задача связана с поиском решения по интегральным данным, получаемым по ВОИЛ, уложенным определенным образом на сканируемом поле. Подобная задача является томографической [4] и для ее корректного решения перспективно применение алгоритмов работы нейронных сетей [5].

В настоящей работе предлагается макет оптоэлектронной нейроподобной измерительной системы, которая является базовым элементом для создания нового класса адаптивных оптоэлектронных контрольно-измерительных устройств, позволяющих восстанавливать пространственную структуру распределений физических полей, осуществлять диагностику состояния и охрану технических и технологических объектов.

Состав макета системы

Система состоит из источника оптического излучения, блока разделения и ввода оптического излучения, распределенной ВОИС, оптоэлектронного блока регистрации оптических сигналов и вычислительной системы обработки данных [6, 7].

Внешний вид разработанного и реализованного макета оптоэлектронной измерительной системы представлен на рис. 1 (см. вторую сторону обложки). Макет состоит из чувствительной поверхности ВОИС (на фотографии — сверху), источника оптического излучения, блока разделения и ввода оптического излучения в ВОИЛ, блока регистрации (на фотографии — под поверхностью ВОИС) и персонального компьютера.

Макет выполнен для ВОИС с взаимно-перпендикулярной схемой укладки ВОИЛ для восстановления координаты и значения одиночных воздей-

14. Потапов В. Т., Мамедов А. М., Шаталин С. В., Юшайтис Р. В. Автодинные мультиплексные волоконно-оптические датчики // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. № 9. С. 903–912.
15. Tavrov A. V., Mishalevsky I. V., Ublinsky D. V. Noncontact interferometric measurement of vibration parameters under diffuse light reflection // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3173. P. 295–297.
16. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Калинин М. Ю. О причине размытия отдельных участков фазового портрета автодинного сигнала полупроводникового лазера при движении внешнего отражателя // Изв. Вузов "Прикладная нелинейная динамика". 2000. Т. 6. № 1. С. 15–20.
17. Usanov D. A., Skripal A. V. Determination of complex motion form by autodyne detection signal of semiconductor laser // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4827. P. 385–393.
18. Коронкевич В. П., Соболев В. С., Дубинцев Ю. Н. Лазерная интерферометрия. Новосибирск: Наука. 1983. 212 с.

19. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Вагарин В. А. Определение амплитуды колебаний оптическим гомодинным методом по высшим гармоникам // ПТЭ. 1994. № 6. С. 612–615.
20. Кикиндзе Г. С., Есаков Б. П., Кузьминых С. Б., Комаров В. М. Опыт оценки степени загрязнения водной среды по изменениям периода биения сердца дафний. Научный центр биологических исследований АН СССР в Пушкине, 1983. 13 с.
21. Колупаев Б. И., Андреев А. А., Самойленко Ю. К. Оптический метод регистрации сердечного ритма у дафний // Гидробиологический журнал. 1977. Т. 13. Вып. 3. С. 119–120.
22. Скрипаль А. В., Усанов А. Д. Синхронизация движений глаза дафнии внешним электрическим полем // Изв. Вузов "Прикладная нелинейная динамика". 2000. Т. 8. № 3. С. 27–30.
23. Usanov D. A., Skripal A. V., Usanov A. D., Skripal A. V., Abramov A. V. Laser diagnostics of daphnia oscillations // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4241. P. 25–31.

УДК 621.373.826:315.61

Ю. Н. Кульчин, д-р физ.-мат. наук,
И. В. Денисов, канд. физ.-мат. наук,
О. В. Кириченко, канд. физ.-мат. наук,
Е. В. Денисова, канд. физ.-мат. наук,
В. А. Седов, Р. С. Дроздов,
Дальневосточный государственный технический
университет, г. Владивосток

МАКЕТ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ НЕЙРОПОДОБНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Описывается макет оптоэлектронной нейроподобной измерительной системы, являющейся базовым элементом для создания нового класса адаптивных оптоэлектронных контрольно-измерительных устройств. Система позволяет восстанавливать пространственную структуру распределений физических полей, осуществлять диагностику состояния и охрану технических и технологических объектов.

Введение

Для мониторинга состояния физических полей и технических объектов, действующих на протяженных исследуемых областях, широкие возможности открывает использование волоконно-оптических измерительных систем на основе распределенных волоконно-оптических измерительных сетей (ВОИС) [1, 2]. Поступающие по волоконно-оптическим измерительным линиям (ВОИЛ) измерительных сетей оптические сигналы изменяются пропорционально значению внешнего физического воздействия и формируют массивы данных о параметрах исследуемых физических полей и их пространственном распределении. В связи с тем, что число ВОИЛ меньше числа исследуемых об-

ластей, возникает проблема решения некорректной задачи [3]. Такая некорректная задача связана с поиском решения по интегральным данным, получаемым по ВОИЛ, уложенным определенным образом на сканируемом поле. Подобная задача является томографической [4] и для ее корректного решения перспективно применение алгоритмов работы нейронных сетей [5].

В настоящей работе предлагается макет оптоэлектронной нейроподобной измерительной системы, которая является базовым элементом для создания нового класса адаптивных оптоэлектронных контрольно-измерительных устройств, позволяющих восстанавливать пространственную структуру распределений физических полей, осуществлять диагностику состояния и охрану технических и технологических объектов.

Состав макета системы

Система состоит из источника оптического излучения, блока разделения и ввода оптического излучения, распределенной ВОИС, оптоэлектронного блока регистрации оптических сигналов и вычислительной системы обработки данных [6, 7].

Внешний вид разработанного и реализованного макета оптоэлектронной измерительной системы представлен на рис. 1 (см. вторую сторону обложки). Макет состоит из чувствительной поверхности ВОИС (на фотографии — сверху), источника оптического излучения, блока разделения и ввода оптического излучения в ВОИЛ, блока регистрации (на фотографии — под поверхностью ВОИС) и персонального компьютера.

Макет выполнен для ВОИС с взаимно-перпендикулярной схемой укладки ВОИЛ для восстановления координаты и значения одиночных воздей-

ствий деформационного физического поля размерностью 5×5 исследуемых областей (рис. 2, см. вторую сторону обложки). Конструкция чувствительной поверхности ВОИС имеет слоистую структуру из шести ВОИЛ I и элементов жесткости 2, распределенных на 25 исследуемых областях 3. В качестве ВОИЛ были использованы стандартные многомодовые оптические шнуры (patch-cord) OFNR (диаметр сердцевины оптического волокна — 50 мкм, оболочки — 125 мкм) со стандартными соединителями FS/PC. Размер макетируемой поверхности ВОИС составляет $30 \times 25 \text{ см}^2$.

Блок разделения и ввода оптического излучения в ВОИЛ выполнен в виде оптической распределительной коробки. Он содержит комбинацию оптического разветвителя 1×6 и оптического шнура стандартной комплектации с соединителями FS/PC через переходную оптическую розетку типа FS для соединения с источником оптического излучения (рис. 3, см. вторую сторону обложки).

Оптоэлектронный блок регистрации (рис. 4, см. вторую сторону обложки) принимает через переходные оптические розетки типа FS сигналы с ВОИЛ и преобразует их для дальнейшей передачи на вычислительную систему [8]. Опрос используемых в макете шести информационных каналов проводится персональным компьютером по стандартной линии COM-порта через адаптер сети MicroLAN однопроводного интерфейса 1-Wire фирмы Dallas Semiconductor. Выбор элементной базы сети MicroLAN определен такими ее возможностями, как наличие несложного протокола, простая структура линии связи, малое потребление мощности компонентами, легкое изменение конфигурации сети, значительная протяженность линий связи, исключительная дешевизна всей технологии в целом и др. [9, 10].

Для мобильности и компактности системы оптический излучатель, а также блоки ввода и регистрации сигналов размещены под ВОИС и имеют разъемы для работы системы совместно с персональным компьютером, как в стационарных условиях, так и в полевом, переносном режиме в транспортном боксе размером $35 \times 30 \times 30 \text{ см}^3$.

Принцип работы

Оптическое излучение от источника света, распространяясь через ВОИЛ ВОИС, несет информацию о характеристиках внешнего физического поля, действующего на исследуемую поверхность. При внешнем механическом воздействии на поверхность ВОИС происходят изменения параметров распространяющихся в ВОИЛ оптических сигналов пропорционально значению этого воздей-

ствия. В качестве внешнего физического поля было выбрано деформационное поле, создаваемое весами грузов с одинаковой площадью основания. После преобразования в блоке регистрации полученных от ВОИС оптических сигналов электрические сигналы поступают в персональный компьютер, где проводится их обработка на основе комбинации приближенных алгебраических и нейроподобных вычислительных методов [11–15].

Достоинствами оптоэлектронных нейроподобных измерительных систем, в основе которых лежит представляемый макет, является то, что размер диагностируемых или контрольно-измерительных поверхностей может составлять от единиц до сотен тысяч квадратных метров с регулируемой чувствительностью на результат воздействия. Отличительными особенностями системы являются ее блочность и возможность оперативной замены составляющих ее элементов. Настоящая измерительная система при большом размере контролируемой поверхности имеет малое число чувствительных элементов, простую архитектуру и обеспечивает возможность изменения конфигурации измерительной сети применительно к условиям задачи.

Заключение

Представляемый макет наглядно демонстрирует возможности и перспективы использования оптоэлектронных измерительных систем с применением искусственного интеллекта. Как видно из результатов макетирования, разработку оптоэлектронных систем данного класса перспективно выполнять в виде блочной конструкции на стандартных элементах. Использование нейросетевых технологий обработки информационных массивов предоставляет широкие возможности, связанные с обучением измерительной системы и ее адаптацией к изменяющимся внешним условиям. Все это способствует развитию исследований, направленных на создание нового класса адаптивных контрольно-измерительных устройств.

Работа выполнена в рамках проекта № 208.03.03.066 раздела "Опто- и акустоэлектроника" подпрограммы "Электроника" научно-технической программы "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники" Министерства образования Российской Федерации и гранта РФФИ № 02-01-00710 ИИ.

Список литературы

1. Кульчин Ю. Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: Физматлит, 2001. 272 с.
2. Кульчин Ю. Н., Денисов И. В., Каменев О. Т. Оптоэлектронная нейроподобная система обработки выходных данных

волоконно-оптической измерительной сети // Письма в Журнал технической физики. 1999. Т. 25. Вып. 6. С. 65–70.

3. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1980. 288 с.

4. Натерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. М.: Мир, 1990. 280 с.

5. Kulchin Yu., Denisov I., Obuh V. et. al. Computer neural networks for processing of optical tomography information // Pacific Science Review. 1999. V. 1. P. 1–4.

6. Денисов И. В., Каменев О. Т., Седов В. А. Устройство ввода оптического излучения в волоконно-оптическую сеть томографического типа // Известия вузов. Приборостроение. 2002. № 7. С. 54–57.

7. Денисов И. В., Каменев О. Т., Седов В. А. Управление шаговыми двигателями механического дефлектора для ВОИС томографического типа // Оптико-электронные информационно-энергетические технологии. 2001. № 2. С. 154–159.

8. Denisov I. V., Sedov V. A., Vorobyev V. V. et. al. The principle of collection optical information from fiber-optical measuring network using 1-Wire network standard // Conference on Lasers, Applications and Technologies — LAT 2002. Technical Digest. 2002. P. 207.

9. Ракович И. Основы построения сетей MicroLAN // ChipNews. 2000. № 6.

10. Ракович Н. Расширение функциональных возможностей сети MicroLAN // ChipNews. 2000. № 10.

11. Hagan M. T., Demuth H. B., Beale M. H. Neural Network Design. Boston, MA: PWS Publishing, 1996.

12. Rumelhart D. E., MacClelland J. L. Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of cognition. Cambridge, MA: MIT Press, 1986. V. 1.

13. Handbook of Neural Network signal processing / Edited by Yu Hen Hu, Jeng-Neng Hwang. London, New York, Washington, D. C.: CRC Press, Boca Raton, 2002. 383 p.

14. Денисова Е. В., Денисов И. В. Применение приближенных алгебраических и нейросетевых методов решения томографической задачи // Электронный журнал "Исследовано в России". 2002. Т. 201. С. 2222–2228, <http://zhurnal.apc.relarn.ru/articles/2002/201.pdf>.

15. Kulchin Yu., Kamenev O., Denisov I. Neural processing system for optical information measuring systems // Distributed fiber optical sensors and measuring networks. Proc. of SPIE, 2001. V. 4357. P. 109–117.

Новости нанотехнологий

МЕТОД ВЫРАЩИВАНИЯ НАНОТРУБОК ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Ученым Калифорнийского университета удалось вырастить углеродные нанотрубки и кремниевые нанопровода при комнатной температуре на подвешенной микроэлектромеханической структуре. Эти микромостики действовали как локализованные микрорезистивные нагреватели. Использовались два типа структур: поликремниевые микроструктуры толщиной 2 нм, полученные при стандартной микрообработке поверхности, и монокристаллические кремниевые микроструктуры толщиной около 20 нм. Мостики сильно легировались фосфором и располагались на высоте 2 мкм над кремниевой подложкой. Участок, на котором необходимо было вырастить нанотрубки, контактно нагревался, при этом остальная микроструктура оставалась при комнатной температуре. Для выращивания кремниевых нанопроводов на микромостик осаждался слой золото-палладиевого катализатора. Затем в аргон вводили силан и, прилагая напряжение, нагревали микромостик. Полученные при скорости роста 1 мкм/мин нанопровода имели от 30 до 80 нм в диаметре и до 10 мкм в длину.

При выращивании нанотрубок ученые наносили слой никеля, железа или никель-железного

сплава на микромостик, а затем нагревали его в присутствии ацетилена. Полученные нанотрубки диаметром от 10 до 50 нм и длиной до 5 мкм росли со скоростью 0,25 мкм/мин и, как уверяют ученые, являются многостеночными.

<http://www.nanotechweb.org/articles/news/2/7/5/1#1010703>

СВЕРХБЫСТРЫЙ МИКРОСКОП

Ученые Бристольского университета (Великобритания) создали микроскоп ближнего поля, который проводит измерения в 10 раз быстрее любого зондового микроскопа. Он способен выполнять сканирование при скорости 150 мм/с, т. е. участок в 20 мкм может быть просканирован менее чем за 10 мс. Ученые увеличили амплитуду колебаний зонда от нескольких нанометров до нескольких микрометров, таким образом, информацию о поверхности стало возможно получать непрерывно, а не дискретно. Интенсивность оптического сигнала зонда увеличивали за счет отражения лазерного луча от оборотной стороны образца. При сравнении изображений тонкой полимерной пленки, полученной за 8 мс, с изображением, полученным в течение 20 мин на обычном микроскопе, не было обнаружено значительных отличий в качестве.

<http://physicsweb.org/article/news/7/7/6>

волоконно-оптической измерительной сети // Письма в Журнал технической физики. 1999. Т. 25. Вып. 6. С. 65–70.

3. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1980. 288 с.

4. Натерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. М.: Мир, 1990. 280 с.

5. Kulchin Yu., Denisov I., Obuh V. et. al. Computer neural networks for processing of optical tomography information // Pacific Science Review. 1999. V. 1. P. 1–4.

6. Денисов И. В., Каменев О. Т., Седов В. А. Устройство ввода оптического излучения в волоконно-оптическую сеть томографического типа // Известия вузов. Приборостроение. 2002. № 7. С. 54–57.

7. Денисов И. В., Каменев О. Т., Седов В. А. Управление шаговыми двигателями механического дефлектора для ВОИС томографического типа // Оптико-электронные информационно-энергетические технологии. 2001. № 2. С. 154–159.

8. Denisov I. V., Sedov V. A., Vorobyev V. V. et. al. The principle of collection optical information from fiber-optical measuring network using 1-Wire network standard // Conference on Lasers, Applications and Technologies — LAT 2002. Technical Digest. 2002. P. 207.

9. Ракович И. Основы построения сетей MicroLAN // ChipNews. 2000. № 6.

10. Ракович Н. Расширение функциональных возможностей сети MicroLAN // ChipNews. 2000. № 10.

11. Hagan M. T., Demuth H. B., Beale M. H. Neural Network Design. Boston, MA: PWS Publishing, 1996.

12. Rumelhart D. E., MacClelland J. L. Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of cognition. Cambridge, MA: MIT Press, 1986. V. 1.

13. Handbook of Neural Network signal processing / Edited by Yu Hen Hu, Jeng-Neng Hwang. London, New York, Washington, D. C.: CRC Press, Boca Raton, 2002. 383 p.

14. Денисова Е. В., Денисов И. В. Применение приближенных алгебраических и нейросетевых методов решения томографической задачи // Электронный журнал "Исследовано в России". 2002. Т. 201. С. 2222–2228, <http://zhurnal.apc.relarn.ru/articles/2002/201.pdf>.

15. Kulchin Yu., Kamenev O., Denisov I. Neural processing system for optical information measuring systems // Distributed fiber optical sensors and measuring networks. Proc. of SPIE, 2001. V. 4357. P. 109–117.

Новости нанотехнологий

МЕТОД ВЫРАЩИВАНИЯ НАНОТРУБОК ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Ученым Калифорнийского университета удалось вырастить углеродные нанотрубки и кремниевые нанопровода при комнатной температуре на подвешенной микроэлектромеханической структуре. Эти микромостики действовали как локализованные микрорезистивные нагреватели. Использовались два типа структур: поликремниевые микроstructures толщиной 2 нм, полученные при стандартной микрообработке поверхности, и монокристаллические кремниевые микроstructures толщиной около 20 нм. Мостики сильно легировались фосфором и располагались на высоте 2 мкм над кремниевой подложкой. Участок, на котором необходимо было вырастить нанотрубки, контактно нагревался, при этом остальная микроstructure оставалась при комнатной температуре. Для выращивания кремниевых нанопроводов на микромостик осаждался слой золото-палладиевого катализатора. Затем в аргон вводили силан и, прилагая напряжение, нагревали микромостик. Полученные при скорости роста 1 мкм/мин нанопровода имели от 30 до 80 нм в диаметре и до 10 мкм в длину.

При выращивании нанотрубок ученые наносили слой никеля, железа или никель-железного

сплава на микромостик, а затем нагревали его в присутствии ацетилена. Полученные нанотрубки диаметром от 10 до 50 нм и длиной до 5 мкм росли со скоростью 0,25 мкм/мин и, как уверяют ученые, являются многостеночными.

<http://www.nanotechweb.org/articles/news/2/7/5/1#1010703>

СВЕРХБЫСТРЫЙ МИКРОСКОП

Ученые Бристольского университета (Великобритания) создали микроскоп ближнего поля, который проводит измерения в 10 раз быстрее любого зондового микроскопа. Он способен выполнять сканирование при скорости 150 мм/с, т. е. участок в 20 мкм может быть просканирован менее чем за 10 мс. Ученые увеличили амплитуду колебаний зонда от нескольких нанометров до нескольких микрометров, таким образом, информацию о поверхности стало возможно получать непрерывно, а не дискретно. Интенсивность оптического сигнала зонда увеличивали за счет отражения лазерного луча от оборотной стороны образца. При сравнении изображений тонкой полимерной пленки, полученной за 8 мс, с изображением, полученным в течение 20 мин на обычном микроскопе, не было обнаружено значительных отличий в качестве.

<http://physicsweb.org/article/news/7/7/6>

НОВЫЙ ТИП НАНОПРОВОДНЫХ ПРИБОРОВ

Ученые института Hahn-Meitner в Берлине создали новый тип транзистора, выращивая полупроводниковые нанопровода на полимерах. Полупроводниковые нанопровода — это одномерные структуры с необычными электрическими и оптическими свойствами, которые могут быть использованы при создании полевых транзисторов, сенсоров и светоизлучающих диодов. В структуре полимер—металл—полимер при толщине полимерных пленок 8 мкм с помощью облучения легкоподвижными ионами создавали отверстия, в которых затем выращивались нанопровода диаметром около 100 нм. Таким образом, на одном квадратном сантиметре помещаются 100 млн нанопроводов. После добавления контактов "исток" и "сток" на верхнюю и нижнюю полимерные пленки структура имела свойства транзистора, при этом металлический слой в середине играл роль электрода затвора. Главный недостаток транзистора — относительно высокий ток утечки.

<http://www.nanotechweb.org/articles/news/2/7/1/>

НОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Используя низкотемпературный метод работы на СТМ, ученым университета UPTON (NY) удалось непосредственно воздействовать на процесс химической реакции путем выборочного возбуждения колебаний отдельных молекул. С помощью иглы СТМ возбуждались колебания в хемисорбированной молекуле аммиака на бронзовой подложке, вибрации молекулы контролировали варьированием параметров СТМ — туннельного тока и напряжения. При подаче напряжения выше некоторого определенного значения возникали колебания, приводящие к движению молекулы аммиака по подложке. При энергии ниже этого значения молекула аммиака отделялась от подложки. Это первый пример использования СТМ в селективной химии, в дальнейшем планируется применять данный метод к более сложным процессам, например, для контроля и усиления реакционной способности на поверхностях путем отыскания новых направлений реакции, недоступных классической термодинамики.

<http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/2003/bnlpr052803b.htm>

Бобринецкий И. И., Гирфанова Н. А.,
Неволин В. К., д-р физ.-мат. наук
<http://www.nanotube.ru>

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

Математическое моделирование двумерных и трехмерных нестационарных контрастных структур в задачах диффузии с размножением и переносом

Номер проекта: 98-01-00356

Год представления отчета: 2001

В течение отчетного периода проводились исследования одномерных, двумерных и трехмерных нестационарных контрастных структур в неоднородных средах. В основе нашего подхода к исследованию контрастных структур в неоднородных средах лежит детальное исследование од-

номерной задачи и последующее приведение двумерной или трехмерной задачи к семейству соответственно одномерных или двумерных задач. Иными словами, используется понижение размерности задачи на единицу.

Выполнено численное моделирование эволюции одномерной контрастной структуры в неоднородной активной нелинейной среде со ступенчатым и с плавным профилем уровня насыщения. Для ступенчатого профиля вычислено максимальное значение скорости дрейфа внутреннего переходного слоя.

НОВЫЙ ТИП НАНОПРОВОДНЫХ ПРИБОРОВ

Ученые института Hahn-Meitner в Берлине создали новый тип транзистора, выращивая полупроводниковые нанопровода на полимерах. Полупроводниковые нанопровода — это одномерные структуры с необычными электрическими и оптическими свойствами, которые могут быть использованы при создании полевых транзисторов, сенсоров и светоизлучающих диодов. В структуре полимер—металл—полимер при толщине полимерных пленок 8 мкм с помощью облучения легкоподвижными ионами создавали отверстия, в которых затем выращивались нанопровода диаметром около 100 нм. Таким образом, на одном квадратном сантиметре помещаются 100 млн нанопроводов. После добавления контактов "исток" и "сток" на верхнюю и нижнюю полимерные пленки структура имела свойства транзистора, при этом металлический слой в середине играл роль электрода затвора. Главный недостаток транзистора — относительно высокий ток утечки.

<http://www.nanotechweb.org/articles/news/2/7/1/>

НОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Используя низкотемпературный метод работы на СТМ, ученым университета UPTON (NY) удалось непосредственно воздействовать на процесс химической реакции путем выборочного возбуждения колебаний отдельных молекул. С помощью иглы СТМ возбуждались колебания в хемисорбированной молекуле аммиака на бронзовой подложке, вибрации молекулы контролировали варьированием параметров СТМ — туннельного тока и напряжения. При подаче напряжения выше некоторого определенного значения возникали колебания, приводящие к движению молекулы аммиака по подложке. При энергии ниже этого значения молекула аммиака отделялась от подложки. Это первый пример использования СТМ в селективной химии, в дальнейшем планируется применять данный метод к более сложным процессам, например, для контроля и усиления реакционной способности на поверхностях путем отыскания новых направлений реакции, недоступных классической термодинамики.

<http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/2003/bnlpr052803b.htm>

Бобринецкий И. И., Гирфанова Н. А.,
Неволин В. К., д-р физ.-мат. наук
<http://www.nanotube.ru>

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

Математическое моделирование двумерных и трехмерных нестационарных контрастных структур в задачах диффузии с размножением и переносом

Номер проекта: 98-01-00356

Год представления отчета: 2001

В течение отчетного периода проводились исследования одномерных, двумерных и трехмерных нестационарных контрастных структур в неоднородных средах. В основе нашего подхода к исследованию контрастных структур в неоднородных средах лежит детальное исследование од-

номерной задачи и последующее приведение двумерной или трехмерной задачи к семейству соответственно одномерных или двумерных задач. Иными словами, используется понижение размерности задачи на единицу.

Выполнено численное моделирование эволюции одномерной контрастной структуры в неоднородной активной нелинейной среде со ступенчатым и с плавным профилем уровня насыщения. Для ступенчатого профиля вычислено максимальное значение скорости дрейфа внутреннего переходного слоя.

Показано, что для ступенчатого профиля имеется, вообще говоря, два стационарных положения внутреннего переходного слоя, одно из которых — устойчивое, а другое — неустойчивое. В случае плавного профиля, в отличие от ступенчатого, могут быть несколько устойчивых и несколько неустойчивых положений внутреннего переходного слоя в пределах области, в которой уровень насыщения плавно изменяется от минимального до максимального значения. Устойчивые и неустойчивые положения образуют чередующуюся последовательность.

Разработаны численный метод вычисления устойчивых и неустойчивых положений внутреннего переходного слоя, а также аналитический метод, который подтверждается численным экспериментом.

Разработан метод вычисления максимальной скорости дрейфа внутреннего переходного слоя для каждого из возможных устойчивых положений. Тем самым, заложена основа дальнейшего исследования дрейфа двумерных контрастных структур в среде с плавным профилем уровня насыщения.

Для двумерных контрастных структур изучены некоторые топологические свойства эволюционирующих пятен.

Одним из наиболее интересных следствий изученных нами общих закономерностей эволюции двумерных контрастных структур в однородной нелинейной активной среде является теорема о монотонном убывании диаметра пятна любой формы и оценка скорости изменения диаметра пятна любой формы. Доказана также теорема о возрастании диаметра внутренних решений задачи о минимальном расстоянии между точками, лежащими на границе пятна (каждое такое решение естественно назвать "талией" пятна). Из этих теорем следует, в частности, что два непересекающихся пятна в процессе эволюции никогда не соприкоснутся, а расстояние между их границами будет монотонно возрастать. Получены некоторые предварительные результаты в области теории эволюции двумерных контрастных структур в неоднородных средах. В частности, обнаружены устойчивые контрастные структуры в неоднородных средах при нулевой скорости переноса. Тем самым, имеется возможность объяснить некоторые наблюдаемые конфигурации магнитного поля в спиральных галактиках за счет неоднородности уровня насыщения процесса генерации магнитного поля, неоднородность может быть связана с рукавной структурой.

Получены некоторые результаты, относящиеся к теории трехмерных контрастных структур. Выполнено численное моделирование дрейфа внутреннего переходного слоя трехмерного пятна в однородной активной нелинейной среде.

В численном эксперименте получена формула, выражающая скорость дрейфа через локальные

метрические свойства поверхности, на которой располагается внутренний переходный слой. Также были исследованы трехмерные нестационарные контрастные структуры в неоднородных средах. Получена аналитическая оценка скорости дрейфа и времени жизни внутреннего переходного слоя в трехмерной однородной активной нелинейной среде. Проведен численный эксперимент, который подтверждает справедливость аналитического выражения для случая радиуса кривизны, который много больше толщины внутреннего переходного слоя. Подготовлена к публикации статья по теории трехмерных контрастных структур. Выполнен цикл работ по приложению теории контрастных структур к практически важным задачам эволюции магнитных полей в спиральных галактиках.

Разработка теории и технологии проектирования многоагентных интеллектуальных адаптивных систем дистанционного обучения (МАГИС)

Номер проекта: 98-01-00081

Год представления отчета: 2001

Согласно поставленным задачам в результате выполнения проекта МАГИС был проведен цикл работ по исследованию моделей адаптивного обучения на основе модели пользователя и разработке методологических и технологических основ создания распределенных многоагентных интеллектуальных адаптивных обучающих систем дистанционного обучения (ДО). Основные научные результаты проекта:

- ♦ Были исследованы различные подходы к адаптивному обучению на основе модели пользователя. Свойство адаптивности было рассмотрено в двух вариантах: адаптивная навигация по гиперграфу информационных ресурсов и адаптивный интерфейс для представления ресурсов обучаемому. Параметры модели студента учитывают индивидуальные психологические и профессиональные особенности, определяемые путем тестирования, в соответствии с которым материалы курса обучения представляются или в виде гипертекста, или в виде активных графических схем, или в виде аудио-файлов. В модели процесса обучения учтены также результаты тестирования изученных материалов. Адаптивность системы ДО также реализована функцией контекстного поиска, т. е. поиска по совпадению слов (или их корней) в запросе и тексте. В зависимости от запроса пользователя материал может быть представлен в виде ссылок на разделы, подразделы соответствующих документов, а также дополнительно могут быть приведены выдержки из текста, содержащие определения, примеры, литературу или фрагменты (абзацы, предложения) контекста.

• Было проведено исследование возможности применения теории интеллектуальных агентов к построению систем ДО. Интеллектуальные агенты МАГИС ориентированы на функции семантического поиска с применением онтологии предметной области, включающих словарь концептов предметной области и отношения между ними (ассоциация, часть — целое и др.). Для редактирования онтологии разработан программный инструментарий преподавателя-эксперта предметной области ПЕГАС. Для отображения и навигации с помощью активных графических схем разработан агент пользовательского интерфейса ГРАНТ. В помощь преподавателю в формировании онтологии и для поиска ресурсов Интернета, относящихся к предметной области, разработана система агентов метаинформационного поиска. Функция поиска поддерживает запросы на английском и русском языках.

• Сформулированы методологические и технологические основы проектирования распределенных многоагентных интеллектуальных адаптивных систем ДО. Разработана архитектура многоагентной системы ДО и системы метаинформационного поиска. Проведено исследование алгоритмов взаимодействия агентов на основе RPC, CORBA, RMI, QQML/KIF, стандарта FIPA. В качестве протокола взаимодействия выбран язык запросов и манипулирования знаниями QQML/KIF. Особенностью реализации взаимодействия является применение комбинации протоколов HTTP и QQML/KIF (с учетом синтаксиса HTML, XML документов), что в отличие от подхода UMBC на основе сокетов позволяет упростить взаимодействие и расширить круг потенциальных пользователей за счет не имеющих прямого выхода в Интернет. Реализованы агенты координации взаимодействий, интерфейса, активных графических схем, фильтрации и извлечения информации, метаинформационного поиска, базы данных, психофизиологического тестирования. Разработанный инструментарий апробирован на прототипе системы ДО по психолингвистике. По результатам исследований опубликовано 16 научных работ.

Теоретическое исследование турбулентных процессов переноса (импульса, тепла и примесей), диссипации энергии турбулентности и разработка их математической модели для течений с переменной плотностью

Номер проекта: 98-01-00943

Год представления отчета: 2001

Работа по проекту в 1988—2000 гг. развивалась в направлении разработки теории турбулентного переноса с учетом влияния пульсаций плотности

среды. Проводилась работа по созданию алгоритма и программы для расчетов системы уравнений Навье—Стокса при малых числах Маха и переменной плотности с фильтрацией акустики. По этим направлениям получены:

- выражения для первых, вторых и некоторых третьих моментов от пульсаций параметров течения для двумерных потоков типа пограничного слоя;
- выражения для турбулентных коэффициентов переноса импульса, тепла (примесей), энергии турбулентности и турбулентного числа Прандтля при малых значениях безразмерного градиента плотности для того же типа потоков;
- система уравнений для пульсаций параметров течения с использованием фавровского способа осреднения;
- модифицированный оператор осреднения с учетом ненулевых значений математических ожиданий пульсаций параметров течения в точках порождения молей (в том числе фавровских), а также с учетом градиента энергии турбулентности в окрестности точки наблюдения и уравнения для определения значений математических ожиданий;
- алгоритм и программа численного интегрирования системы уравнений Навье—Стокса при малых числах Маха и переменной плотности среды.

Механика трещин в пористых средах

Номер проекта: 98-01-00486

Год представления отчета: 2001

За отчетный период в рамках проекта было продолжено теоретическое исследование особенностей распространения трещин в насыщенных пористых средах, для которых характерно взаимное влияние течения жидкости в трещине и пористой среде (пласте) и поля деформаций пласта. Изучены влияние проницаемости среды на характер особенности упругих и гидродинамических полей в окрестности вершины трещины и эффективную работу разрушения, возможность медленного роста трещины вследствие перераспределения жидкости и индуцирование трещиной течения жидкости в ее окрестности. Исследован осмотический механизм распространения трещин. Типичной (но не единственной) областью приложения таких задач является механика гидравлического разрыва пласта (ГРП).

Тепломассоперенос при турбулентном течении в каналах сложной геометрии

Номер проекта: 98-01-00739

Год представления отчета: 2000

Проведен теоретический анализ закономерностей процессов переноса в пристенной зоне турбу-

лентных отрывных течений, что позволило выявить характерные параметры турбулентного потока, управляющие процессами тепло- и массопереноса в течениях сложной геометрии. Проанализирована структура турбулентного пограничного слоя с положительным градиентом давления как неотъемлемого элемента турбулентных течений со сложной геометрией. Были проведены систематические экспериментальные исследования теплообмена в круглой трубе и кольцевом канале, заполненных зернистым слоем, позволившие обосновать полученные при теоретическом анализе закономерности теплоотдачи. Исследованы роль и вклад пристенной зоны в процессы теплопереноса в каналах с зернистым слоем. На основе модификации стандартной k - ϵ -модели разработана физико-математическая модель турбулентности для расчета турбулентных течений с сильными положительными градиентами давления и отрывных течений, улучшающая результаты расчета по сравнению со стандартной k - ϵ -моделью.

Разработка методов математического моделирования для гамильтоновых колебательных систем

Номер проекта: 98-01-00060

Год представления отчета: 2001

Разработан численно-аналитический алгоритм для построения решения ограниченной Ньютоновой задачи трех тел в виде тригонометрических полиномов. Этот итерационный численно-аналитический алгоритм реализован в системе символьных вычислений (ССВ) "Maple" и позволяет получить аналитические выражения для искоемых переменных в виде двукратных полиномов Фурье, содержащих каждый более 1,5 тыс. членов. С помощью ССВ "Mathematica" построена цепочка канонических преобразований, реализующих нормализацию гамильтонианов в смысле Пуанкаре—Биркгофа для ограниченных Ньютоновых задач 6 и 7 тел. Построение нормальных форм Пуанкаре—Биркгофа позволило исследовать устойчивость в смысле Ляпунова равновесных решений указанных гравитационных моделей и сформулировать ряд теорем об устойчивости бисекториальных решений и о неустойчивости радиальных решений, доказанных на основании теоремы Арнольда—Мозера. Разработан алгоритм приведения канонических уравнений, описывающих ограниченные задачи космической динамики, к форме Пуанкаре, в которой им сформулирована основная проблема качественной теории дифференциальных уравнений аналитической динамики. Сформулированы и доказаны новые теоремы существования функций Грина для

разнообразных краевых задач систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Теоретическая разработка и исследование эффективных реализаций алгоритмов расчета корневой, полюсно-нулевой и динамических чувствительностей для САПР аналоговой радиоэлектроники и в других приложениях

Номер проекта: 98-01-00977

Год представления отчета: 2000

Выполнено исследование оптимального представления пучков больших разреженных матриц аналоговых электронных схем (ПБРМ АЭС) в форме связанных списков и алгоритмов оптимального упорядочения ПБРМ для минимизации роста числа новых ненулевых элементов (НЭ) и объема арифметических операций (флопсов) при триангуляции. Исследован пучковый вариант метода обратных итераций для вычисления собственных векторов пучков ПБРМ АЭС. Установлено, что при применении связанных списков большая часть вычислений связана с поиском требуемых ненулевых элементов в типовых вычислениях. Вместо связанных списков использована система макрокоманд для типовых операций с адресацией конкретных НЭ в процессе расчета. Это приводит к предварительному формированию кода решения задач при фиксированной структуре матрицы (этап имитации). Все вычисления на этапе выполнения расчетных задач оперируют только с кодом решения. В результате время расчета сокращается более чем в 5 раз. Для реализации формул расчета первых и вторых корневых и полюсно-нулевых чувствительностей детализированы расчетные формулы для всех типов элементов. Применен специальный базис переменных активных приборов, исключая традиционное использование "внутренних" узлов. Это позволило повысить точность расчетов, исключить "паразитные собственные частоты" прибора, рассчитать вторые чувствительности для RC-цепочек, динамических емкостей и резисторов активного слоя.

Новые подходы и численные алгоритмы для моделирования вязких течений газа и жидкости

Номер проекта: 98-01-00155

Год представления отчета: 2001

За истекший период (1998—2000 гг.) в ходе выполнения проекта были получены следующие результаты:

- Построена математическая модель для описания течений вязкого сжимаемого газа, учитывающая неравновесность системы относительно поступательных и вращательных степеней свободы. Проведено исследование перехода между так называемым маховским и регулярным отражением ударных волн в недорасширенных струях в зависимости от чисел Маха и Кнудсена с учетом температурной неравновесности газа.
- Построены неявные алгоритмы решения квазигазодинамических (КГД) уравнений. Алгоритмы основаны на записи системы КГД уравнений в векторном виде, линейаризации ее методом Ньютона и последующем решении полученной единой системы линейных уравнений. Проведено численное моделирование течений недорасширенной осесимметричной струи и пространственного взаимодействия двух струй.
- Кинетически согласованные разностные схемы обобщены для расчетов на треугольных сетках в двумерном случае. Предложены граничные условия для дозвуковых частей границы. Построены варианты схем повышенного порядка точности и метода расщепления потока. Проведено

тестирование разработанных алгоритмов на примере трансзвукового обтекания аэродинамических профилей.

- Построены точные решения КГД систем для течений вязкой несжимаемой жидкости. Проведено моделирование термокапиллярных течений в замкнутых полостях. Построены обобщения КГД уравнений для описания течений смеси двух не реагирующих между собой газов.
- Предложены и реализованы итерационные методы решения уравнения Пуассона на многопроцессорном вычислительном комплексе с распределенной памятью. Предложены параллельные варианты методов неполного разложения Холецкого сопряженных градиентов и его модифицированного варианта. На основе опыта расчетов исследована область применимости КГД моделей. Показано, что с ростом разреженности газа КГД уравнения теряют применимость. Обобщение КГД уравнений на течения с неравновесностью по степеням свободы позволяет расширить область их применения на течения с умеренными числами Кнудсена. Подведены некоторые итоги исследования КГД моделей.



**ГЛАС
ИНФО**

Производство и продажа радиоэлектронной аппаратуры Поставка электронных компонентов

- ☐ Многофункциональные телефоны с АОН серии "Phone MASTER" (не требуют питания 220 В)
- ☐ Система охраны и контроля с оповещением через сеть сотовой связи стандарта GSM "Страж-GSM"
- ☐ Телефонные коммутаторы и микро-АТС серии "Quadro" (не требуют питания 220 В)
- ☐ Устройства защиты телефонной линии серии "Блокиратор" (не требуют питания 220 В)
- ☐ Миниатюрные цифровые диктофоны на FLASH-памяти
- ☐ Множество полезных устройств, изделий и комплектующих для монтажа радиоэлектронной аппаратуры.

У нас Вы найдете то, что нужно!

- Для квартиры, загородного дома, небольшого офиса — мини АТС (всего за \$30—\$50), охранная система с оповещением на Ваш сотовый номер (всего \$125!), отличный многофункциональный телефон с АОН, цифровым (!) автоответчиком и компьютерным интерфейсом (всего \$80).
- Для автомобиля — система охраны и контроля с оповещением на Ваш сотовый номер (всего \$125!)
- Для студентов и бизнесменов, для всех любопытных и любителей новинок электроники — миниатюрные цифровые диктофоны на FLASH-памяти (от \$115). Записываем лекции, переговоры, все что угодно — и все это умещается в спичечном коробке. От 2 до 150 часов непрерывной записи, вечное хранение, компьютерный интерфейс.
- Большой выбор различных электронных устройств и комплектующих.
Зайдите на наш сайт и позвоните в офис!

Наш адрес: Москва, ул. Профсоюзная, д. 82, офис 107
тел.: (095) 740-9551, тел./факс: 334-8434

Проезд до станции метро "Калужская", первый вагон из центра, сразу возле выхода из метро
(в помещении архива РГАНТД, центральной вход)

e-mail: info@glasinfo.ru
<http://www.glasinfo.ru>

CONTENTS

- Shalobaev E. V., Starzhinsky V. E., Shilko S. A.**
*Manufacture Technologies of Cog-Wheels and Drives
 for Microelectromechanical Systems. Cogged
 Micromechanisms of MEMS: The Experiment of the Production
 and the Statement of the Problem on the Perspective* 2

The analysis of the foreign and native developments in the area of the mechanical components of microelectromechanical systems is produced; the problems are disclosed and the ways of their solution are planned.

- Balysheva O. L., Smirnov Yu. G., Konovalova L. P.**
The Development of a Reference System on SAW Components 6

The work's results on the development of a reference system (database) on SAW components are presented. The project on the system development is approved and financially supported by the Russian Foundation for Basic Research. The database contains information on literature, SAW material parameters, mathematical models, SAW filter characteristics, and organizations and firms (worldwide) specialized on SAW devices.

- Valiev K. A., Kalnov V. A., Kiryanov A. P., Maltsev P. P.**
*The Simulation of Mobile Diffraction Gratings for
 Microsystems Technique* 10

The versions of simulation of mobile diffraction gratings used as a countermeasure feeler of the micromechanical accelerometer surveyed. The results of simulation display the expressed relation of parameters of a diffraction pattern (intensity of a principal diffraction peak for the chosen angles of diffraction) from value of a gap between mobile and fixed lattices.

- Slesarev Yu. N.** *Signal Forming at Magneto-Optical Reproduction
 of the Information* 13

The analysis of signal degradations is adduced at reproduction thermomagnetic record of the information at the destabilizing factors. The methods formation digital signal from reproducing signal with allowance of noise in a play are investigated. Is drawn a conclusion about the best suitability for extreme detecting pulse methods of a record, founded on the obtained property signal.

- Kozlov A. V., Reveleva M. A., Tikhonov R. D.** *Influence
 Distribution of Charge Carrier on the Relative Sensitivity Value
 of Bipolar Dual-Collector Magnetotransistor* 17

Using the program package of device-and-process simulation ISE TCAD we investigated lateral dual-collector bipolar transistor functioning when formed in diffusion well. The dependency of relative current sensitivity and distribution charge carriers was investigated at low and high injection level. It is established, that the negative relative current sensitivity appears in BMT as a result of the involved in recombination electron and hole flows redistribution induced by magnetic field, i. e., as the result of concentration-recombination mechanism of magnetosensitivity.

- Putilov A. V.** *On the Development of the Works in Russia
 in the Area of Nanomaterials and Nanotechnologies* 22

The materials of the report in the condition and the development of nanotechnology and nanomaterials creation discussed in the meeting of the Ministry of the industry, science and technologies of Russia Federation are stated.

- Levichev V. V., Maksimov G. A., Mishkin V. P., Filatov D. O.**
*Correlation Between the Topography of Emitting Mirface of
 a Semiconductor Laser Diode and Structure of its Radiation in
 Near Field* 28

The correlation between the structure of the InGaAs/GaAs semiconductor laser diodes (LDs) with InGaAs quantum wells (QWs) and the spatial structure of the LD radiation was investigated by Scanning Near-field optical Microscopy (SNOM) and cross-sectional Atomic Force Microscopy (AFM). To reveal the LD structure selective chemical etching (enchant with higher etching rate for GaAs and lower one for InGaP and InGaAs) was applied. It was shown to be possible to associate the spatial structure of LD radiation with the structure of the active layer by means of comparing the data obtained by both methods, in particular, to find out the position of the QWs in the waveguide relative to the emitting mode profile.

- Smirnov V. V., Vorobiev O. A., Mityureva A. A., Primagina T. E.**
Atomic Holography with Source Focusing by Atomic Lens 31

The results of theoretical studies the crossovers of atomic lens for atomic beams and the possibility of their use as the sources of illumination for the corpuscular in-line holography are represented. It is shown that resolution in the reconstructed image is of the order of crossover diameter in the focus of atomic lens, whose value comprises fractions of angstrom. The conjugated image does not affect strongly the reconstructed image.

- Usanov D. A., Skripal A. V.** *Nanovibration and
 Microdisplacement Diagnostics of Components of Microsystem
 Techniques and Biological Specimen* 35

The possibility of measurements of nanovibration and microdisplacement are described with the use of semiconductor laser as a measurement system operating in autodyne detection regime. The method of vibration and displacement diagnostics of components of biological specimens has been developed by using of autodyne laser system. As a example the results of micromovement measurements of eye and hart of freshwater crayfish — *Daphnia* have been presents.

- Kulchin Yu. N., Denisov I. V., Kirichenko O. V.,
 Denisova E. V., Sedov V. A., Drozdov R. S.** *Breadboard
 Model of the Optoelectronic Measuring Neural-Like System* 40

In this work the breadboard model of the optoelectronic measuring neural-like system is described. This breadboard model is the base element for creation of a new class adaptive optoelectronic control and measuring devices. The system allows restoring spatial structure of distributions of physical fields, to carry out diagnostics and protection of technical and technological objects.

Подписку за рубежом принимают:

For foreign subscribers:
 ЗАО МК-Периодика. E-mail: info@periodicals.ru;

Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev
Index 79493.

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