

К сведению авторов журнала "МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"

Решением ВАК Минобразования России журнал "Микросистемная техника" включен в Перечень научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук (Бюллетень ВАК Минобразования России, 2003, № 2).

Уважаемые авторы, при подготовке рукописей статей просим руководствоваться следующими рекомендациями

Объем статьи, предлагаемой к публикации, не должен превышать 15 страниц машинописного текста, напечатанного на белой бумаге (формата А4), на одной стороне листа через два интервала (не более 30 строк и 60 знаков в строке на странице). В объем статьи входят: текст, иллюстрации, таблицы и библиография.

В редакцию представляются в двух экземплярах:

- текст статьи, подписанный всеми авторами с указанием даты представления;
- иллюстрации, подписанные на обороте карандашом с указанием фамилии автора, номера иллюстрации и названия статьи;
- перечень подрисовочных подписей;
- аннотация размером не более 5—7 строк на русском и английском языках;
- фамилии, инициалы авторов и название статьи — на английском языке;
- сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, занимаемая должность, домашний и служебный адреса и телефоны, факс и E-mail);
- акт экспертизы.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, инициалы и фамилии авторов, ученая степень, название организации (полное в соответствии с последней редакцией устава), заглавие и аннотация.

Формулы, буквенные обозначения, цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми. Во втором экземпляре простым карандашом размечаются все символы, сходные по начертанию, и текстовые выделения: буквы — двумя черточками (прописные — снизу, строчные — сверху); верхние и нижние индексы (включая штрихи и степени) отчеркиваются дужками $\cup$ и $\cap$

соответственно; полужирный шрифт подчеркивается прямой линией, курсив — волнистой линией, а разрядка — короткими штрихами. Следует обратить внимание на четкость математических знаков и сходных по начертанию букв (прописных и строчных, латинского и греческого алфавитов).

Иллюстрации выполняются с учетом последующего воспроизведения их средствами оперативной полиграфии (с использованием сканера); штриховые (чертежи, схемы, графики, рисунки) — программно, с использованием графических редакторов, или вручную (черной тушью или пастой) на белой плотной бумаге; тоновые (фотографии) — на матовой бумаге с высокой контрастностью.

Цветные иллюстрации представлять на диске в графических редакторах.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом: для книг и сборников — фамилии и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год и желательно общее число страниц; для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала, год, том, номер и номера страниц. Если число авторов более четырех, то необходимо указать первых трех со словами "и др.". Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений.

Статьи, набранные на компьютере, желательно представлять как в виде распечатки на принтере (рисунки на лазерном принтере), так и в файловом виде на дискете 3,25", выполненном в текстовом редакторе Microsoft Word.

Рукописи статей направлять по адресу: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4/1, журнал "Микросистемная техника". **Тел./факс редакции (095) 269-55-10, e-mail: it@novtex.ru**

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 621.3.049.77

Ж. И. Алферов, акад. РАН¹,
А. Л. Асеев, чл.-корр. РАН²,
С. В. Гапонов, чл.-корр. РАН³,
П. С. Копьев, д-р физ.-мат. наук, проф.¹,
В. И. Панов, д-р физ.-мат. наук, проф.⁴,
Э. А. Полторацкий, д-р физ.-мат. наук, проф.⁵,
Н. Н. Сибельдин, д-р физ.-мат. наук⁶,
Р. А. Сулис, чл. корр. РАН¹,

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург),

² Институт физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск),

³ Институт физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород),

⁴ МГУ им. М. В. Ломоносова (г. Москва),

⁵ ГНИИ физических проблем им. Ф. В. Лукина (г. Москва),

⁶ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (г. Москва)

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Дан краткий обзор современного состояния и описаны некоторые перспективы в области наноматериалов и нанотехнологий. Изложены основные представления о полупроводниковых, магнитных и молекулярных наноструктурах, рентгеновских многослойных зеркалах, фуллереноподобных и конструктивных наноматериалах. Рассмотрено применение наноструктур в электронике и открывающиеся в связи с этим перспективы в информационных технологиях, технике связи и др. Описаны основы нано- и микроэлектромеханики: технологии, элементная база, приборы и системы. Рассмотрены методы диагностики наноструктур.

ВВЕДЕНИЕ

Физика низкоразмерных структур — актуальнейшая и наиболее динамично развивающаяся область современной физики твердого тела. Интерес к этой области связан как с принципиально новыми фундаментальными научными проблемами и физическими явлениями, так и с перспективами создания на основе уже открытых явлений совершенно новых квантовых устройств и систем с широкими функциональными возможностями для опто- и микроэлектроники, измерительной техни-

ки, информационных технологий нового поколения, средств связи и пр. Результатом исследований низкоразмерных систем стало открытие принципиально новых, а теперь уже широко известных явлений, таких как целочисленный и дробный квантовый эффект Холла в двумерном электронном газе, вигнеровская кристаллизация квазидвумерных электронов и дырок, обнаружение новых композитных квазичастиц и электронных возбуждений с дробными зарядами, высокочастотных блоховских осцилляций, а также многое другое. Современные полупроводниковые лазеры на гетеропереходах также основаны на использовании низкоразмерных систем (структуры с квантовыми ямами, самоорганизованными квантовыми точками и квантовыми нитями). Наиболее выдающиеся достижения в этой области отмечены тремя Нобелевскими премиями по физике (1985 г. — за открытие квантового эффекта Холла; 1998 г. — за открытие дробного квантового эффекта Холла; 2000 г. — за труды, заложившие основы современных информационных технологий).

Развитие этой области открыло возможности конструирования средствами зонной инженерии и инженерии волновых функций и последующего изготовления с помощью современных высоких технологий наноструктур (сверхрешетки, квантовые ямы, точки и нити, квантовые контакты, атомные кластеры и т. д.) с электронным спектром и свойствами, требуемыми для обнаружения и изучения новых физических явлений или для соответствующих приложений. Сконструированные таким образом наноструктуры являются, по существу, искусственно созданными материалами с наперед заданными свойствами.

Вне всяких сомнений, элементная база, основанная на использовании разнообразных низкоразмерных структур, является наиболее перспективной для электронной техники новых поколений. Однако при переходе к системам нанометрового масштаба начинает отчетливо проявляться квантовомеханическая природа квазичастиц в твердом теле. В результате возникает принципиально новая ситуация, когда квантовые эффекты (размерное квантование, конфинмент, туннелирование, интерференция электронных состояний и др.) будут играть ключевую роль в физических процессах в таких объектах и в функционировании приборов на их основе.

Достижения в разработке и изготовлении наноструктур различного назначения в наибольшей степени определяются уровнем развития технологий, которые позволяют с атомной точностью по-

лучать наноструктуры необходимой конфигурации и размерности, а также методов комплексной диагностики свойств наноструктур, включая контроль в процессе изготовления (*in situ*) и управление на его основе технологическими процессами. По многим прогнозам именно развитие нанотехнологий определит облик XXI века, подобно тому как открытие атомной энергии, изобретение лазера и транзистора определили облик XX столетия.

Ниже дан краткий обзор сегодняшнего состояния и некоторых перспектив в области наноматериалов и нанотехнологий, который, как мы надеемся, позволит получить общее представление об этой области. В настоящее время это весьма обширная область, включающая в себя целый ряд направлений физики, химии, биологии, электроники, медицины и других наук. Поэтому более подробное изложение потребовало бы значительно увеличения объема этой статьи.

1. НАНОМАТЕРИАЛЫ

Если при уменьшении объема какого-либо вещества по одной, двум или трем координатам до размеров нанометрового масштаба возникает новое качество или это качество возникает в композиции из таких объектов, то эти образования следует отнести к наноматериалам, а технологии их получения и дальнейшую работу с ними — к нанотехнологиям. Подавляющее большинство новых физических явлений на наномасштабах происходит из волновой природы частиц (электронов и т. д.), поведение которых подчиняется законам квантовой механики. Проще всего это пояснить на примере полупроводников. Когда по одной или нескольким координатам размеры становятся порядка и меньше длины волны де Бройля носителей заряда — полупроводниковая структура становится резонатором, а спектр носителей заряда — дискретным. То же самое с рентгеновскими зеркалами. Толщины слоев, способных отражать в фазе рентгеновское излучение, лежат в нанометровом диапазоне. В других случаях возникновение нового качества может быть связано с менее наглядными явлениями. Представляется, что такой подход позволяет составить достаточно полное представление о наноматериалах и возможных областях их использования.

1. Полупроводниковые наноструктуры

Используя методы "зонной инженерии" и "инженерии волновых функций" можно конструировать квантоворазмерные структуры с заданным электронным спектром и требуемыми оптическими, электрическими и другими свойствами. Поэтому они очень удобны для приборных применений.

Квантовые ямы. Этим термином обозначаются системы, в которых имеется размерное квантование движения носителей заряда в одном направлении. Первоначально основные исследования квантовых ям проводились на инверсионных каналах кремниевых МОП транзисторов, позднее и до настоящего времени широко исследуются свойства квантовых ям в гетероструктурах. Основные физические явления в квантовых ямах: размерное квантование электронного спектра, квантовый эффект Холла (целочисленный и дробный), при специальном приготовлении очень высокая подвижность электронов. Основные методы получения квантовых ям на гетероструктурах: металло-органическая газовая эпитаксия и молекулярно-пучковая эпитаксия.

Приборные применения: высокочастотные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов, полупроводниковые гетеролазеры и светодиоды от ближнего ИК до голубого света, лазеры дальнего ИК диапазона, параметрические источники света среднего ИК диапазона, фотоприемники среднего ИК диапазона, примесные фотоприемники дальнего ИК диапазона, приемники дальнего ИК диапазона на квантовом эффекте Холла, модуляторы в ближнем ИК диапазоне.

Квантовые проволоки — это системы, в которых движение носителей заряда квантовано в двух направлениях. Первые квантовые проволоки выполнялись на основе квантовых ям посредством создания потенциального рельефа с помощью двух затворов, расположенных над квантовой ямой. Основные физические явления в квантовых проволоках: квантование проводимости, сильно коррелированный электронный транспорт. Основные методы получения квантовых проволок те же, что и квантовых ям, плюс использование прецизионного травления или специальных затворов. Приборных применений пока нет.

Квантовые точки — нанобъекты, в которых движение носителей заряда квантовано во всех трех направлениях. Имеют дискретный энергетический спектр (искусственный атом). Основные физические явления в квантовых точках: одноэлектронные и однофотонные явления. Методы получения те же, что и для квантовых ям, однако несколько иные режимы, если происходит спонтанный рост квантовых точек по механизму Странски—Крастанова. Или использование прецизионной литографии для создания квантовых точек из квантовых ям.

Приборные применения: лазеры и светодиоды в ближнем ИК диапазоне, фотоприемники для среднего ИК диапазона, однофотонные приемники, однофотонные генераторы, одноэлектронные транзисторы.

Структуры с туннельно-прозрачными барьерами (системы квантовых ям и сверхрешетки). Основные физические явления в таких системах: резо-

нанное туннелирование; формирование мини-зонного спектра в сверхрешетках — периодических системах, содержащих много квантовых ям, разделенных туннельно-прозрачными барьерами; нелинейные электрические и оптические явления в сверхрешетках. Методы выращивания этих структур те же, что и для квантовых ям.

Приборные применения: резонансно-туннельные диоды (генераторы и смесители в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах); мощные генераторы и смесители на сверхрешетках: каскадные лазеры среднего и дальнего ИК диапазонов.

Фотонные кристаллы — системы, в которых имеется зонный спектр для фотонов. Основные физические явления: отсутствие пропускания (полное отражение) света в определенном диапазоне частот, резонансные фотонные состояния. Существует несколько методов выполнения фотонных кристаллов, но все они пока несовершенны.

Возможные приборные применения: эффективные лазеры с низкими пороговыми токами, системы управления световыми потоками.

2. Магнитные наноструктуры

Развитие методов напыления сверхтонких пленок и нанолитографии привело в последнее десятилетие к активному изучению магнитных наноструктур. Стимулом этой активности является идея о создании новых магнитных наноматериалов для сверхплотной записи и хранения информации. При этом предполагается, что каждая частица несет один бит информации. Если расстояние между частицами составляет 100 нм, то ожидаемая плотность записи — 10 Гбит/см². Принципиальными ограничениями плотности записи при таком подходе являются магнитостатическое взаимодействие частиц и значительные термические флуктуации. Последние имеют существенную специфику для малых ферромагнитных частиц, которая проявляется в экспоненциальном росте вероятности распада намагниченного состояния с уменьшением размера частицы (суперпарамагнетизм).

Достижением в исследовании магнетизма наноматериалов следует признать открытие эффекта гигантского магнитосопротивления. Суть эффекта заключается в изменении сопротивления (порядка нескольких десятков процентов) многослойной структуры из сверхтонких ферромагнитных и немагнитных слоев (например, Co/Cu) при смене ферромагнитного упорядочения в структуре на антиферромагнитное. Можно сказать, что такие многослойные структуры представляют собой новый тип доменной структуры ферромагнетика, в котором роль доменов играют ферромагнитные пленки, а доменными стенками являются пленки немагнетика. Этот эффект находит свое применение при создании новых датчиков магнитного поля, а

также при разработке сред для сверхплотной записи информации.

Дальнейшее продвижение в область малых размеров привело к открытию нового явления — туннелирования магнитного момента в сверхмалых ферромагнитных частицах. К этой группе наноматериалов относятся искусственные кристаллы, содержащие магнитные кластеры Mn₁₂ и Fe₃. Магнитный момент таких кластеров равен 10 магнетонам Бора, т. е. занимает промежуточное положение между магнитным моментом атомов и макроскопических частиц. Обменное взаимодействие между кластерами в кристалле отсутствует, а магнитная анизотропия весьма высока. Таким образом, появляется возможность квантовых переходов между магнитными равновесными состояниями в кластерах. Изучение этих процессов представляется интересным и важным с точки зрения разработки элементной базы квантовых компьютеров.

3. Двумерные многослойные структуры из пленок нанометровой толщины

В данном случае рассматриваются такие комбинации материалов, которые обеспечивают наиболее сильное отражение электромагнитных волн. Длина волны излучения, эффективно взаимодействующего с многослойной структурой, и ее период связаны соотношением $\lambda = 2d \sin \alpha$, где α — это угол скольжения падающего луча. Диапазон длин волн, в котором эффективно использование этих устройств, простирается от экстремального ультрафиолетового излучения ($\lambda = 60$ нм) до жесткого рентгеновского ($\lambda = 0,01$ нм), т. е. диапазон, в котором наиболее длинные волны в 6000 раз больше самых коротких. Для видимого света это соотношение равно ~2. Соответственно, столь же велико количество явлений природы, физические проявления которых находятся в этой спектральной области.

Структуры представляют собой искусственные одномерные кристаллы из пленок нанометровой толщины, и кроме возможности их использовать для управления излучением в зависимости от материалов слоев (диэлектрик, полупроводник, металл, сверхпроводник), они могут быть интересны и для других физических приложений. Так, если одним из материалов многослойных наноструктур служит сверхпроводник, то это система множественных последовательно включенных совершенно идентичных джозефсоновских переходов. Если металл чередуется с полупроводником — это система последовательно включенных диодов Шоттки.

В наиболее коротковолновой части диапазона 0,01–0,02 нм рентгеновские зеркала позволяют фокусировать излучение синхротронов или рентгеновских трубок на исследуемые объекты или формировать параллельные пучки. В частности, их применение увеличивает эффективность рентге-

новских трубок в 30—100 раз, что делает возможным заменить синхротронное излучение в ряде биологических, структурных и материаловедческих исследований. Приблизительно в этом же диапазоне лежит излучение высокотемпературной плазмы (лазерной и ТОКАМАКов). Здесь зеркала нашли применение как дисперсионные элементы для спектральных исследований.

В диапазоне 0,6—6 нм лежит характеристическое излучение легких элементов от бора до фосфора. Здесь рентгеновские зеркала также используются для исследования спектров в приборах элементного анализа материалов.

Рентгеновская многослойная оптика широко применяется для формирования фильтрации и управления поляризацией в синхротронных источниках. В области 10—60 нм лежат линии излучения солнечной плазмы. Объективы космических телескопов из рентгеновских зеркал и сейчас находятся на орбите и регулярно передают на Землю изображение Солнца на линиях Fe IX—Fe XI (17,5 нм) и He II (30,4 нм).

Особое место занимает применение многослойных зеркал в технологиях микроэлектроники. Мы являемся свидетелями и участниками крупнейшего события в твердотельной электронике: это переход на длину волны более чем в 10 раз короче (от 157 нм к 13 нм) в литографии — процессе, обеспечивающем получение рисунка полупроводниковых приборов и интегральных схем. Именно длина волны излучения, используемого для получения рисунка, отвечает за размеры его минимальных элементов. До сих пор изменение длины волны излучения от поколения к поколению литографических установок не превышало 25 %. Одновременно в 10 раз повышаются требования к точности изготовления всех элементов оптики и механизмам настройки и экспонирования. Фактически это означает переход всех обрабатывающих технологий на атомарную точность. Неучастие в этом процессе может оставить страну в прошлой цивилизации.

4. Молекулярные наноструктуры

Органические материалы в последнее время интенсивно вовлекаются в нанотехнологии и как неотъемлемые участники технологического процесса (например, в нанолитографии), и как самостоятельные объекты и устройства — в так называемой молекулярной электронике.

Многообразие органического мира хорошо известно (около 2 млн синтезированных соединений, и это количество непрерывно растет) — от "полунеорганических" комплексов (углеродные кластеры, металлоорганика) до биологических объектов (ДНК, гемы). С точки зрения материалов для нанотехнологий и молекулярной электроники условно можно выделить три основных класса: *полимеры*, *молекулярные ансамбли* (molecular assemblies, self-

aggregated systems) и *единичные молекулы*: последние называются также "умные" или "функциональные" молекулы (smart molecules).

Первый класс изучается наиболее давно и по общей совокупности работ, наверное, наиболее интенсивно. Кроме того, диэлектрические, оптические и люминесцентные свойства различных поли- и олигомеров уже широко используют в технике и электронике, они стоят ближе всего к рынку и экономическому эффекту.

Второй класс — молекулярные ансамбли нанометровых размеров — изучается сравнительно недавно. К ним относятся, например, агрегаты на основе порфиринов (в том числе хлорофилла) и других амфифильных молекул, получаемые из растворов. Супрамолекулярная (то есть надмолекулярная, иерархическая) организация сложна и интересна, ее исследование и связь с (фото-) электрическими свойствами проливает свет на биологические и природные процессы (клеточный транспорт, фотосинтез). Обнаружена чувствительность, а главное — уникальная избирательность таких систем к внешним воздействиям (свет, атмосфера, вибрация), что позволяет использовать их в различных сенсорах, в том числе со смешанной электронно-ионной проводимостью. Исследуются наноразмерные молекулярные стержни и проволоки (molecular rods and wires), в том числе в качестве интерфейса между неорганическими материалами (например, двумя металлическими электродами). Предполагается, что со временем будет происходить интегрирование с классической приборной базой.

Вообще системы, построенные в основном на Ван-дер-Ваальсовых или водородных связях, представляют собой очень перспективный с точки зрения дизайна твердого тела объект с двумя уровнями свободы: внутримолекулярная структура, которая может быть модифицирована (изменена при синтезе) и которая ответственна, например, за поглощение или испускание света; межмолекулярная структура, которая может быть изменена при росте кристалла (пленки, эпитаксиального слоя), и которая ответственна за фазовые явления, транспорт носителей заряда, магнитные свойства. В качестве примера: фталоцианин меди и периферийно-фторированный фталоцианин меди структурно изоморфны, однако представляют собой полупроводники *p*- и *n*-типа, соответственно. Полностью органические выпрямляющие переходы на основе вакуумно-осажденных слоев интенсивно исследуются в настоящее время. Вместе с тем, допирование пленок фталоцианина сильным акцептором (например, йодом) изменяет фазовую структуру вплоть до получения квазиодномерной металлической проводимости.

Важную группу составляют также самоорганизующиеся монослои (self-assembled monolayers, SAM's) на основе органических молекул или цепочек различного строения, которые исследуют как

перспективные передающие материалы при литографии, так и для изучения электропереноса вдоль контура сопряжения молекулы. Здесь уже начинается третий класс.

Третий класс или способ применения органических материалов в нанотехнологиях самый молодой. Это то, что в западных конкурсах называется *emergent* или *futuristic technologies* (внезапно возникающие или футуристические технологии). Если жидко-кристаллические дисплеи, технологии CD-R, фотопреобразователи, сенсоры и другие устройства на органических материалах хорошо известны и постепенно (хотя и медленно — из-за понятного торможения со стороны уже широко инвестированного и раскрученного "силиконового" и GaAs-ного приоритета) приходят на рынок, то одномолекулярные устройства (приборы) в реальном производстве отсутствуют. Более того, если макроскопические свойства классических органических твердых тел (молекулярных кристаллов) имеют удовлетворительное теоретическое описание, то процессы, ожидаемые в одномолекулярных устройствах, видятся гораздо менее отчетливо. Самый упрощенный подход: берем некую молекулу, которая представляет собой хорошо организованную квантовую систему, делаем к ней электроды и получаем, например, диод. Тут сразу возникает много новых вопросов. В частности, граница металл/молекулярный полупроводник даже на макроуровне весьма неопределена.

И тем не менее истинно "наноразмерные" эффекты ожидаются именно в этом классе. Конструируются молекулярные наномашинки и наномоторы (роторы), динамические молекулярные переключатели, транспортировщики энергии, устройства распознавания, хранения информации. Для исследования инъекции носителей и туннельного тока в отдельных молекулах совершенствуются методы зондовой микроскопии.

Следует впрочем не забывать, что в числе главных достоинств (если не самых главных) органики находятся дешевизна и доступность. Изогранный синтез новых соединений делает их едва ли не дороже высокочистых неорганических веществ, поэтому наибольшие практические перспективы имеют исследование и модификация (оптимизация) широко распространенных и изученных (более или менее) соединений с высокой стабильностью и способностью интегрироваться (не обязательно) в разработанные технологические процессы. Из наиболее известных — это фталоцианины, фуллерены, политиофены и полиарены.

5. Фуллереноподобные материалы

Графит, алмаз и не всеми признанный карбин в течение долгого времени считались основными аллотропными состояниями углерода. Их применяли

во многих отраслях промышленности и техники, в том числе в микро- и оптоэлектронике. За 10 лет до конца XX века были обнаружены сначала в космосе, а потом получены в лаборатории новые **молекулярные формы углерода** — фуллерены и фуллереноподобные индивидуальные вещества и материалы. В конце прошлого века по фуллеренам (их получению, исследованию и применению) каждый год выходило в свет до 1000 и более публикаций. Обнаружено, что самоорганизация фуллереновых структур происходит повсюду: в космосе, в природных процессах на Земле, в промышленных процессах (черная металлургия), в лабораториях. Свойства и структура этих материалов настолько разнообразны и интересны, что фуллереновые материалы начинают широко применять в промышленности: от микро- и наноэлектроники до эффективных медицинских препаратов.

К фуллереновым материалам, полученным и изучаемым в настоящее время, относятся следующие:

Фуллерены. Они образуют молекулярно-кристаллические твердые тела, часто вследствие большого размера и высокой симметрии своих молекул — пластические кристаллы без температуры плавления. Они образованы молекулами C_{2n} , имеющими форму либо сфер, либо эллипсов, хотя возможны их другие комбинации (полусферы с цилиндрами из углерода). Возможны многослойные сферы или эллипсы ("оолитовые" или "луковичные" структуры). Размер молекул главного представителя фуллеренов C_{60} составляет 1 нм, и в растворе молекулы обладают свойствами броуновской частицы.

Углеродные нанотрубки. Они образованы из свернутых по различным направлениям графитовых плоскостей и закрыты на концах сетчатыми углеродными полусферами. Такие "графитовые" нанотрубки могут быть однослойными и многослойными. Последние могут быть переведены окислением и травлением в однослойные. Углеродные нанотрубки могут иметь разветвления и изгибы. В этом случае они теряют исходную "графитовую" структуру и не называются "графитовыми". Однослойные нанотрубки имеют размеры от 1 до 10 нм в диаметре и длину 100—1000 нм и более, а многослойные имеют диаметры и длину в 10—100 раз больше. Твердые тела могут быть образованы из жгутов нанотрубок или коллинеарных (но более коротких) образований.

Наполненные фуллерены (эндо-производные). Наполнением могут быть молекулы инертных или других газов, небольшие органические и неорганические молекулы, атомы металлов (щелочных, щелочно-земельных, лантанидов и др.). Несмотря на трудности получения и малый выход таких производных, присущие им свойства заставляют исследовать их синтез и возможные применения. Эти производные в большинстве своем имеют крайне низкие потенциалы ионизации по сравнению с ме-

таллами, и по-видимому, обладают металлическими свойствами.

Наполненные углеродные нанотрубки. Помимо перечисленного выше для наполнения могут быть использованы фуллерены меньшего диаметра.

Неорганические нанотрубки (MoS_2 , WSe_2 и др.).

Патентная литература и применения фуллереноподобных материалов чрезвычайно разнообразны. Фуллереноподобные материалы обладают рядом замечательных характеристик, включая химическую стойкость, высокую прочность, жесткость, ударную вязкость, теплопроводность и (что, возможно, важнее всего) электропроводность. В зависимости от тонких особенностей молекулярной симметрии фуллерены и нанотрубки могут быть диэлектриками, полупроводниками, обладать металлической проводимостью и высокотемпературной сверхпроводимостью. Эти свойства в сочетании с наномасштабной геометрией делают их почти идеальными — возможно даже уникальными — материалами для изготовления электрических проводов, сверхпроводящих соединений или целых устройств, которые с полным основанием можно назвать изделиями молекулярной электроники. Химической сборке элементов различных схем благоприятствуют свойства фуллерена, который может образовывать ионы от $+6$ до -6 и в различных матрицах — связи с донорами, акцепторами, свободными радикалами и ионами. Фуллерены могут также использоваться при создании средств молекулярной оптоэлектроники для фемтосекундной оптоволоконной передачи информации. Полимеризация фуллеренов при электроннолучевом или ионизирующем воздействии дает возможность получать резисты нового поколения.

Углеродные нанотрубки используются в качестве иглочатых щупов сканирующих зондовых микроскопов и в дисплеях с полевой эмиссией, в высокопрочных композиционных материалах, электронных устройствах со схемами из коротких нанотрубок, подвергнутых манипулированию и сборке. Молекулярный характер фуллереновых материалов позволяет разработать химическую стратегию сборки этих элементов в пригодные для использования структуры, материалы и возможно даже молекулярные электронные устройства.

6. Конструкционные наноматериалы

Использование современных конструкционных материалов обычно ограничивается тем, что увеличение прочности приводит к снижению пластичности. Данные по нанокompозитам показывают, что уменьшение структурных элементов и более глубокое изучение физики деформационных процессов, которые определяют пластичность наноструктурных материалов, могут привести к созданию новых типов материалов, сочетающих высокие прочность и пластичность.

Анализ проведенных в последние годы отечественных и зарубежных исследований свидетельствует о высокой перспективности следующих основных направлений в области разработки конструкционных материалов: изготовление наноструктурных керамических и композиционных изделий точной формы, создание наноструктурных твердых сплавов для производства режущих инструментов с повышенной износостойкостью и ударной вязкостью, создание наноструктурных защитных термо- и коррозионно-стойких покрытий, создание обладающих повышенной прочностью и низкой воспламеняемостью полимерных композитов с наполнителями из наночастиц и нанотрубок.

В лабораторных исследованиях получены образцы изделий из нанофазной керамики (плотности на уровне 0,98—0,99 от теоретического значения) на основе оксидов алюминия и ряда переходных металлов. Экспериментально подтверждено, что плотная наноструктурная керамика имеет повышенную пластичность при сравнительно невысоких температурах. Увеличение пластичности при уменьшении размера частиц вызвано сдвиговым перемещением нанокристаллических зерен относительно друг друга при наложении нагрузки. При этом отсутствие нарушения межзеренной связи объясняется эффективным диффузионным переносом атомов в приповерхностном слое частиц. В перспективе повышенная пластичность означает возможность сверхпластичного формования керамических и композиционных изделий, что исключает необходимость трудо- и энергозатратной финишной обработки материалов высокой твердости.

В последние годы разработаны нанокompозитные металлокерамические материалы, в частности, на основе WC/Co и TiC/Fe , значительно превосходящие по износостойкости, прочности и ударной вязкости аналоги с обычной микроструктурой. Повышенные эксплуатационные характеристики нанокompозитных материалов обусловлены образованием при спекании специфических непрерывных нитевидных структур, формирующихся в результате трехмерных контактов между наночастицами разных фаз. Разработка и внедрение в промышленное производство технологии создания нанокompозитных изделий будет способствовать решению проблемы изготовления высококачественных режущих инструментов.

Повышение коррозионной стойкости наноструктурных покрытий обусловлено, в первую очередь, снижением удельной концентрации примесей на поверхности зерен по мере уменьшения их размеров. Более чистая поверхность обеспечивает более однородную морфологию и более высокую коррозионную стойкость межзеренных границ. Наноструктурные покрытия характеризуются сверхвысокой прочностью. Один из основных механизмов

упрочнения обусловлен эффектом скопления дислокаций вблизи препятствий, которыми при уменьшении размеров зерен являются их границы. Важным преимуществом покрытий с наноразмерной структурой является обусловленная повышенной пластичностью возможность снижения в них остаточных напряжений, что позволяет изготавливать покрытия миллиметровой толщины.

Использование диспергированных в полимерной матрице неорганических наполнителей из наноразмерных порошков позволяет существенно повысить огнестойкость пластмасс, являющуюся одним из основных недостатков при использовании их в качестве конструкционных материалов, поскольку продукты сгорания полимеров, как правило, представляют собой ядовитые вещества. Результаты исследований показывают, что снижение горючести может быть доведено до самозатухания пламени. При этом наноразмерные порошковые наполнители не снижают механической прочности и обрабатываемости материалов. Полимерные нанокompозиты обладают высокой абляционной стойкостью, что открывает перспективы их использования для защиты поверхности изделий, эксплуатируемых в условиях воздействия высоких температур.

II. НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Современный научно-технический прогресс несомненно определяется развитием электроники, основой которой являются достижения в различных областях фундаментальных наук, главным образом, физики твердого тела, физики полупроводников, а также твердотельной технологии. Последние достижения науки показывают, что в отличие от традиционной микроэлектроники, потенциальные возможности которой в ближайшее десятилетие, по-видимому, будут исчерпаны, дальнейшее развитие электроники возможно только на базе принципиально новых физических и технологических идей.

Так, на протяжении ряда десятилетий повышение функциональной сложности и быстродействия систем достигалось увеличением плотности размещения и уменьшением размеров элементов, принцип действия которых не зависел от их масштаба. При переходе к размерам элементов порядка десятков или единиц нанометров возникает качественно новая ситуация, состоящая в том, что квантовые эффекты (туннелирование, размерное квантование, интерференционные эффекты) оказывают определяющее влияние на физические процессы в наноструктурах и функционирование приборов на их основе.

Многообещающим является также создание наноструктур, в которых роль функциональных

элементов выполняют отдельные молекулы. В перспективе это позволит использовать принципы приема и переработки информации, реализуемые в биологических объектах (молекулярная наноэлектроника). Новые возможности в повышении мощности, температурной и радиационной стойкости, расширении диапазона частот, улучшении эргономических характеристик приборов открывает направление, в котором синтезируются идеи и технологические достижения вакуумной и твердотельной электроники (вакуумная наноэлектроника).

Создание наноструктур базируется на новейших технологических достижениях в области конструирования на атомном уровне твердотельных поверхностных и многослойных структур с заданным электронным спектром и необходимыми электрическими, оптическими, магнитными и другими свойствами. Требуемая зонная структура таких искусственных материалов обеспечивается выбором веществ, из которых изготавливаются отдельные слои структуры ("зонная инженерия"), поперечных размеров слоев (размерное квантование), изменением степени связи между слоями ("инженерия волновых функций"). Наряду с квантово-размерными планарными структурами (двумерный электронный газ в квантовых ямах, сверхрешетки) исследуются одно- и нульмерные квантовые объекты (квантовые нити и точки), интерес к которым связан с надеждами на открытие новых физических явлений и, как следствие, на получение новых возможностей эффективного управления электронными и световыми потоками в таких структурах.

Нанотехнологии призваны решить следующие задачи в электронике:

- резкое повышение производительности вычислительных систем;
- резкое увеличение пропускной способности каналов связи;
- резкое увеличение информационной емкости и качества систем отображения информации с одновременным снижением энергозатрат;
- резкое повышение чувствительности сенсорных устройств и существенное расширение спектра измеряемых величин, что важно, в частности, для задач экологии;
- создание высокoэкономичных твердотельных осветительных приборов;
- существенное увеличение удельного веса использования электронных и оптоэлектронных компонентов в медицинских, биологических, химических, машиностроительных и других технологиях.

Резкое повышение производительности вычислительных систем необходимо в связи с переходом технологии интегральных схем к нанометровому масштабу. В табл. 1 приведен прогноз уменьшения

Таблица 1

	Year of production, nm	2003	2010	2013	2016
DRAM	1/2 Pitch	100	45	32	22
MPU	1/2 Pitch	107	45	32	22
MPU	Printed Gate Length	65	25	18	13
MPU	Physical Gate Length	45	18	13	9

характерных размеров ИС памяти и процессоров (ITRS Roadmap 2002), в табл. 2 — перспектива уменьшения энергии на одно переключение

Таблица 2

Год	2003	2010	2013	2016
Энергия на переключение, фемтоДж	0,137	0,015	0,007	0,002

Таким образом, развитие "традиционной микроэлектроники" подразумевает переход к нанотехнологии. Развитие нанотехнологии позволит сконструировать и принципиально новые элементы ИС, такие, например, как "одноэлектронные" устройства, потребляющие предельно малые энергии на переключение, или сверхбыстродействующие биполярные Si—Ge транзисторы с базами толщиной в несколько нанометров. Устройства на основе наноструктур принципиально необходимы и для считывания информации в вычислительном процессе из-за предельно низких уровней сигналов. Примером могут служить магнитные считывающие устройства, основанные на эффекте гигантского магнетосопротивления, возникающем в слоистых металлических магнитоупорядоченных средах с толщиной слоев в несколько нанометров.

Резкое увеличение пропускной способности каналов связи подразумевает создание высокоэффективных излучающих и фотоприемных устройств для ВОЛС и устройств СВЧ техники для терагерцового и субтерагерцовых диапазонов. Сразу же следует подчеркнуть, что эффективные лазерные диоды для линий связи есть типичный продукт нанотехнологии, поскольку они представляют собой квантово-размерные наногетероструктуры с характерной толщиной слоев в несколько нанометров. Эффективные фотоприемные устройства также базируются на таких полупроводниковых гетероструктурах. Дальнейшее развитие излучающих и фотоприемных приборов с неизбежностью связано с развитием нанотехнологии квантовых точек — нанообластей в полупроводнике, ограничивающих движение электронов в трех направлениях. Здесь можно ожидать появления устройств принципиально нового типа, использующих квантово-механические закономерности.

То же относится и к твердотельным устройствам СВЧ электроники. Переход на наноуровень позволит существенным образом улучшить характеристики СВЧ транзисторов и создать приборы, основанные на квантово-механических эффектах (например, резонансно-туннельные диоды и приборы на основе сверхрешеток).

Резкое увеличение информационной емкости и качества систем отображения информации с одновременным снижением энергозатрат связано с развитием нескольких направлений. Прежде всего, это монокристаллы и гибридные матрицы светоизлучающих диодов (когерентных и некогерентных). И здесь наиболее эффективны и многофункциональны полупроводниковые источники на основе наноструктур. Полупроводниковые лазеры средней и большой мощности, изготовленные на основе наноструктур, эффективны для использования в проекционных системах различного назначения (в т. ч. для проекционных телевизоров). Наноструктурированные материалы (например, на основе углеродных нанотрубок) чрезвычайно перспективны при создании эффективных катодов для плазменных панелей любой площади.

Резкое повышение чувствительности сенсорных устройств и значительное расширение спектра измеряемых величин как путем улучшения характеристик уже существующих приборов и устройств при переходе к размерам, при которых становятся существенными квантово-механические эффекты, так и за счет создания принципиально новых приборов, основанных на возможности "калибровать" различные объекты (атомные кластеры и молекулы) в нанометровом диапазоне размеров и использовать высокую поверхностную чувствительность наноструктурированных материалов. Примером использования нанотехнологий для этих целей может служить создание на основе квантовых полупроводниковых наноструктур лазеров дальнего и среднего ИК диапазонов, позволяющих контролировать загрязнение атмосферы с высокой чувствительностью и точностью.

Создание высокоэкономичных твердотельных осветительных приборов — важная задача современного общества. На освещение сейчас расходуется около 20 % потребляемой в мире энергии и перевод хотя бы половины освещения на высокоэкономичные полупроводниковые источники света на основе наноструктур уменьшит мировые затраты энергии на 10 %.

Существенное увеличение удельного веса использования электронных и оптоэлектронных компонентов в медицинских, биологических, химических, машиностроительных и других технологиях. Здесь важно иметь в виду несколько обстоятельств. Прежде всего, благодаря возможности создавать с помощью нанотехнологий вещества и структуры с наперед заданным оптическим спектром можно "настраивать" источники и приемники излучения, что

позволяет селективно воздействовать на биологические и химические процессы и получать сигналы в необходимых спектральных диапазонах для контроля таких процессов. Другое важное обстоятельство состоит в том, что именно благодаря применению наноструктур удастся использовать очень компактные мощные источники лазерного излучения. Это позволит развить высокоточные, экономичные и экологически чистые технологии обработки материалов. Подчеркнем, что эти же источники очень эффективны для применения в медицине.

III. НАНО- И МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

1. Актуальность направления

Прогресс в разработке нано- и микроэлектромеханических устройств и систем обещает такую же революцию в технике, какую совершила микроэлектроника в электронике. Микроэлектромеханика стала самостоятельным направлением 15–20 лет назад. Основой этого направления являются объединение поверхностной микрообработки, развитой в микроэлектронной технологии, с объемной обработкой и использование новых материалов и физических эффектов. Бурный рост микроэлектромеханики, являющейся, по сути, междисциплинарным направлением, связан, прежде всего, с широким использованием микроэлектронных технологий с сотовой микроструктурой. Такой подход позволил за короткое время создать новые объемные конструктивные элементы — мембраны, балки, полости, отверстия с большим аспектным соотношением (калибром), за счет использования так называемых LiGA-технологий на основе синхротронного излучения и т. д. Это обеспечило прорыв в области микродвигателей микророботов, микронасосов для микрофлюидики, сверхчувствительных сенсоров различных физических величин (давления, ускорения, температуры и др.), микрооптики. Так, микроэлектромеханические датчики в современных автомобилях являются основой систем безопасности (воздушные подушки), контроля за состоянием колес, подвески и т. п. Но наиболее ярким представителем микроэлектромеханических систем служат сканирующие зондовые микроскопы, являющиеся основой не только ряда измерительных систем в нанометровом диапазоне, но и основой технологических устройств для нанотехнологии.

Переход к наноэлектромеханике связан с использованием нанотехнологий и новых физических эффектов. Так, при создании полостей — важного компонента различных устройств — используются все в большей мере самоорганизующиеся процессы (углеродные нанотрубки, пористые мембраны на основе оксида алюминия). Это позволяет увеличить воспроизводимость, повысить надежность, поскольку малейшие изменения

размеров, связанные с использованием традиционных технологий, ведут к экспоненциально сильному изменению параметров.

В развитых зарубежных странах этому направлению уделяется большое внимание — создаются исследовательские институты, развернута подготовка специалистов. В США этими вопросами занимаются такие известные фирмы, как Intel, MEMS Industry Group, Sandia National Labs. Рассматриваемый круг вопросов — от ручки без разбрызгивания чернил до беспроводной передачи данных, оптических устройств управления оружием и миниспутников. Агентство перспективных разработок МО США реализует программу "Умная пыль", направленную на создание сверхминиатюрных устройств, способных генерировать энергию, проводить мониторинг окружающей среды, накапливать и передавать информацию.

Таким образом, развитие нано- и микроэлектромеханики является необходимым условием развития основ нанотехнологий.

2. Технологические аспекты разработки нано- и микроэлектромеханических систем

Наноимпринтинг (печать с помощью штампа). Это развиваемые взамен оптической литографии новые групповые технологии получения рисунка с рекордным разрешением < 10 нм. Технологии позволяют реализовать как получение маски для дальнейших технологических операций, так и функциональных структур.

Интеллектуальные нанотехнологические комплексы на базе сканирующей зондовой техники. Высоковакуумные комплексы, обеспечивающие локальную модификацию поверхности (фазового состава, потенциального и пространственного рельефа, структурной перестройки) в областях < 10 нм. Модификация осуществляется за счет полевых, механических и тепловых воздействий, а также за счет ввода реактивных сред непосредственно в область воздействия под зондом. Для повышения производительности необходимы многозондовые картриджи и устройства прецизионного многократного позиционирования (с точностью < 2 нм).

Технологии самоорганизации и самосборки. При уменьшении размеров < 10 нм создание упорядоченных структур и одиночных структур традиционными методами становится труднореализуемой задачей. Особенно важны с этой точки зрения различные формообразующие структуры (полости), в которых можно создавать наноэлементы. Важную роль играют также технологии получения упорядоченных нанотрубок (особенно углеродных) и пористых мембран на основе оксида алюминия.

Технология получения рисунка на базе сканирующей зондовой микроскопии с разрешением 0,5–1 нм за счет использования в качестве зондов углеродных нанотрубок и прецизионных позиционеров.

3. Разработка элементной базы нано- и микроэлектромеханики

Нанозлементы для прямого преобразования электрической энергии в механическую с высокой эффективностью. Статические элементы на основе ориентированных пучков нанотрубок во много раз эффективнее пьезоэлектрических и могут работать, например, в физиологическом растворе. Динамические элементы на базе нанотрубок обеспечивают коммутацию в пикосекундном диапазоне. Однослойные нанотрубки с большим аспектным соотношением могут перемещаться в жидких средах за счет волнообразного движения. Все это открывает большие перспективы как для технических, так и для биомедицинских применений.

Заполнение нанополостей (в том числе нанотрубок) чужеродными атомами, молекулами, кластерами, фуллеренами позволяет не только изменять характеристики элементов, но и создавать одномерные кристаллы, хранить и доставлять определенные компоненты в нужное место для создания новых элементов с помощью зондовых технологий. Заполнение двумерных и трехмерных нанопористых сред позволяет создавать фотонные кристаллы — основу для оптических коммутирующих устройств "беспороговых" лазеров, сверхчувствительных фотоприемников. Большой интерес для медицины представляет прививка к нанотрубкам органических комплексов и ДНК.

Сверхчувствительные сенсоры без промежуточного преобразования энергии. Они могут быть созданы, поскольку частотный диапазон механических колебаний нанозлементов близок к вращательному и колебательному спектрам молекул.

Эффекты автоэмиссии наряду с квантовомеханическими эффектами, связанными с переносом зарядов, играют все большую роль в таких нанозементах. Так, пороги автоэмиссии для нанотрубок на несколько порядков ниже, чем в традиционных элементах. Это открывает возможности создания наноламп, скомбинированных с нанотранзисторами, что важно для устройств обработки информации, эксплуатирующихся в экстремальных условиях и условиях спецвоздействий.

4. Нанозлектромеханические приборы и системы

Нанозлектромеханические 3У терабитной емкости. Матричные многозондовые сканирующие устройства в сочетании с регулярными средами из нанозлементов позволяют создать терабитные 3У с плотностью до 10 бит/см^2 , что необходимо для систем обработки информации новых поколений.

Микро- и нанооптоэлектромеханические системы. Управляемые микромеханические зеркальные отражатели и дифракционные решетки обеспечивают коммутацию и селекцию сигналов при беспроводной передаче данных, в системах управ-

ления оружием, микророботами и т. д. со скоростью передачи 10^{12} бит/с .

Микроробототехника. Создание микроустройств, способных передвигаться, собирать, хранить и передавать информацию, осуществлять определенные воздействия по заложенной программе или команде. Разработка микродвигателей, микронасосов, микроприводов.

Нано- и микроэлектромеханические датчики различных физических величин (ускорения, давления, температуры, влажности, изменения размеров, скорости протекания химических и физических процессов).

Гибкие плоские дисплеи и устройства отображения информации.

5. Важнейшие области применения

Таковыми областями применения нано- и микроэлектромеханических устройств и систем могут быть:

- информационные и компьютерные технологии;
- машиностроение;
- биология и медицина;
- наносистемы для вредных производств, ядерной энергетики;
- наносистемы для систем вооружения и космических систем.

IV. ДИАГНОСТИКА НАНОСТРУКТУР

Современное развитие физики и технологии твердотельных наноструктур, проявляющееся в непрерывном переходе топологии элементов электронной техники от субмикронных размеров к нанометровой геометрии потребовало разработки новых и усовершенствования существующих диагностических методов, а также создания новых образцов оборудования для анализа свойств и процессов в низкоразмерных системах, в наноматериалах и в искусственно создаваемых наноструктурах. В этом плане особое внимание уделяется созданию и применению взаимодополняющих высокоразрешающих методов практической диагностики и характеристики наноструктур, обеспечивающих получение наиболее полной информации об основных физических, физико-химических и геометрических параметрах наноструктур и протекающих в них процессов.

В настоящее время существует огромное число методов диагностики, еще больше методик исследования физических и физико-химических параметров и характеристик твердотельных и молекулярных структур. Вместе с тем, получение наноструктур, низкоразмерных систем и новых наноструктурированных материалов с заданными свойствами, предназначенных для применения в современной электронике, ставит и новые диагностические задачи. Для решения современных задач диагности-

ки наноструктур требуется адаптация к этим задачам традиционных методов (оборудования), а также развитие новых, прежде всего локальных (до масштабов 0,1 нм) методов исследования и анализа свойств и процессов, присущих объектам нанометровой геометрии и системам пониженной размерности.

Методы нанодиагностики должны быть по возможности неразрушающими и давать информацию не только о структурных свойствах нанобъектов, но и об их электронных свойствах с атомным разрешением. Для разработки нанотехнологий решающим оказывается также возможность контролировать атомные и электронные процессы *in situ* с высоким временным разрешением, в идеале до времени, которое равно или меньше периода атомных колебаний (до 10^{-13} с и менее). Необходимо также диагностика электронных, оптических, магнитных, механических и иных свойств нанобъектов на "наноскопическом" уровне. Невозможность полного удовлетворения этих требований приводит к использованию комплекса методов диагностики нанобъектов, среди которых необходимо выделить следующие основные группы методов:

- *электронная микроскопия высокого разрешения*, которая исторически явилась первым методом, реально обеспечивающим визуализацию структуры объектов с атомным разрешением. К этому методу примыкают различные модификации электронной микроскопии, обеспечивающие проведение химического анализа нанобъектов, исследования *in situ*, поверхностно-чувствительные методы, такие как отражательная электронная микроскопия, микроскопия медленных электронов и другие. Во многих случаях электронная микроскопия высокого разрешения является единственным источником получения информации о внутренней структуре и структуре границ раздела таких нанобъектов, как квантовые ямы и квантовые точки;
- *методы сканирующей электронной микроскопии*, которые вплотную приближаются по разрешению к атомному разрешению, сохраняя возможность получения информации без существенного (разрушающего) воздействия на исследуемые объекты с получением разнообразной информации о химическом составе нанобъектов, их электрических (метод наведенного тока), оптических (катодоллюминесценция) и других свойствах. Для получения информации об объеме нанобъектов развиты методы электронной томографии;
- *сканирующая туннельная микроскопия*, являющаяся поверхностно-чувствительным методом визуализации атомной структуры твердых тел; проведение спектроскопических исследований с атомным разрешением вместе с привлечением возможностей для *in situ* экспериментов при по-

вышенных и пониженных температурах, использование других методов зондовой микроскопии и возможности манипулирования на уровне отдельных атомов делает эти методы важнейшим инструментом для нанотехнологий и нанодиагностики;

- *рентгендифракционные методы*, особенно с использованием высокой светимости синхротронных источников, они дают уникальную информацию об атомной структуре нанобъектов без их разрушения;
- *методы электронной спектроскопии* для химического анализа, *ожже-электронной спектроскопии*, *методы фотоэлектронной спектроскопии*, *рамановской и ИК-спектроскопии*, *метод фотоллюминесценции*, которые активно развиваются с повышением разрешающей способности, что делает эти методы весьма полезными при диагностике нанобъектов.

Дальнейшее развитие всевозможных методов диагностики (в частности, диагностики, встроенной в технологию), учитывающих специфику нанобъектов и их характерные размеры, является неотъемлемой частью развития высоких технологий получения и анализа свойств наноструктур нового поколения. При этом формирование комплексных методов практической диагностики диктуется как технологическими задачами получения наноструктур и создания на их базе следующего поколения электронных и оптических устройств (транзисторов, лазеров и др.), так и их специфическими физическими, физико-химическими и топологическими свойствами, часто не укладывающимися в рамки стандартных представлений о свойствах вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо еще раз подчеркнуть, что развитие науки о наноструктурах и, прежде всего, о квантовых наноструктурах (нанофизики) и нанотехнологий даст возможность получения наноматериалов с качественно новыми свойствами. Развитие нанoeлектроники и наномеханики послужит основой качественно нового этапа в разработке новейших информационных технологий, средств связи, в решении проблем качественно нового уровня жизни и пр. Успех в развитии этих направлений определится, по сути, решением двух основных проблем: разработка надежных способов создания наноматериалов и нанобъектов с требуемыми свойствами, включая использование методов поатомной сборки и эффектов самоорганизации; разработка новых и развитие существующих методов нанодиагностики с атомным разрешением. Современный прогресс в области нанотехнологий позволяет надеяться, что уже в недалеком будущем многие проблемы будут решены.

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 681.121: 621.3.049.776.43

В. Н. Котов, канд. техн. наук, **И. И. Черепашин**,
НИИ многопроцессорных вычислительных систем
Таганрогского государственного радиотехнического университета

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ КРЕМНИЕВЫЙ МИКРОТЕРМОАНОМЕОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКИХ И ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕД

Рассматривается интегральный кремниевый микротермоанометр в качестве универсального сенсорного элемента для построения датчиков расхода жидких и газообразных сред. Предложена конструкция, позволяющая использовать различные схемы включения подогревных и термочувствительных резистивных элементов для регулировки параметров процесса измерения скорости потока. Представлены методы контроля расхода, используемые при построении тепловых расходомеров на базе микротермоанометра.

Одну из лидирующих позиций по многочисленности областей применения среди современных средств контроля занимают приборы, измеряющие объемный и массовый расход жидкостей и газов — расходомеры.

Современные технологии измерения расхода и управления им находятся под пристальным вниманием самых различных пользователей, предъявляющих все более жесткие требования к эффективности процесса измерения, к которым можно отнести предприятия энергетической, химической, медицинской промышленности, автомобилестроения и т. д. Стараясь максимально удовлетворить эти требования, изготовители приборов вынуждены повышать точность измерений в целях оптимизации технологических процессов и увеличения их производительности, применять гибкие методы производства при постоянном снижении затрат. В результате повышается надежность и уменьшается стоимость расходомеров, основанных на относительно новых технологиях измерения расхода [1].

Построение относительно простого, дешевого и малогабаритного электронного расходомера для жидких и газообразных сред, функционирующего с приемлемой точностью, представляет собой довольно трудную задачу, что подтверждается многообразием видов расходомеров и физических принципов, лежащих в основе их работы [1, 2].

Одним из немногих, претендующих на универсальность (применяемых как для жидких, так и для газообразных сред в широком диапазоне измеряемых расходов), является термоанометрический (калориметрический) принцип измерения расхода [2–5]. Если также учесть возможность этого способа непосредственно измерять массовый расход (массовую скорость) и относительную простоту реализации чувствительного элемента, то можно оценить его техническую и экономическую перспективность.

Классические тепловые расходомеры [2, 3] в большинстве случаев в качестве сенсорного элемента используют нагреваемую проволоку или пленку, изготов-

ленную из материала с высоким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) — меди, платины, никеля, которая непосредственно или через стенку трубопровода контактирует с контролируемой средой. В связи с этим необходимо использовать такие материалы и технологические процессы по изготовлению чувствительных элементов расходомеров, которые не изменяли бы свойства материала в результате коррозии и старения, а также позволяли бы устранить процесс индивидуального подбора номинала подогревных и (или) термочувствительных элементов при повышении метрологических, а также при снижении массогабаритных и стоимостных показателей прибора.

Одним из таких материалов является кремний. Планарная кремниевая микроэлектронная технология — отработанный и относительно дешевый технологический процесс, позволяющий изготавливать интегральные микроэлектронные компоненты с высокой геометрической точностью и идентичностью электрофизических свойств. Кроме того, монокристаллический кремний подходит для изготовления микротермоанометров, что обусловлено следующими физическими свойствами:

- кремниевый монокристалл, имеющий на поверхности защитный слой оксида, устойчив к многочисленным физическим и химическим воздействиям;
- обладает низкой теплоемкостью и высокой теплопроводностью;
- позволяет с помощью варьирования концентрации легирующей примеси формировать локализованные от подложки область p - n -перехода резистивные термочувствительные и подогревные элементы в

широком диапазоне ТКС и тем самым создавать высокочувствительные (к изменению температуры) схемы на их основе.

Описанные в литературе [5–9] микроэлектронные термоанемометрические сенсорные элементы в своем большинстве изготовлены с применением пленочной технологии и обладают высокой чувствительностью к изменению скорости потока и высоким быстродействием (3–7 мс), однако их применение ограничено измерением параметров потока газообразных сред в диапазоне объемного расхода ~0,001–15 л/ч. Кроме того, используемая при их изготовлении технология профилирования [6, 7] значительно повышает требования к сборке расходомера и воздействующим механическим нагрузкам.

В НИИ МВС ТРТУ разработан конструктивно-топологический вариант и изготовлена опытная партия компактных универсальных кремниевых интегральных микротермоанемометрических сенсорных элементов КМТА-1 [10], предназначенных для построения датчиковых устройств измерения расхода жидких и газообразных сред различного класса и назначения. Топология и принципиальная схема кристалла КМТА-1 представлены на рис. 1, а и б соответственно.

Термоанемометрический кремниевый сенсорный элемент представляет собой набор подогревных R_n и измерительных R_i резисторов, позволяющих выполнять заданную регулировку мощности нагревателя и реализовать различные варианты измерительных схем.

На подогревные резисторы могут быть возложены две функции — нагрев кристалла и измерение температуры в центре кристалла. Различные температуры разогрева кристалла достигаются с помощью варьирования мощности нагревателя, что можно осуществить как изменением си-

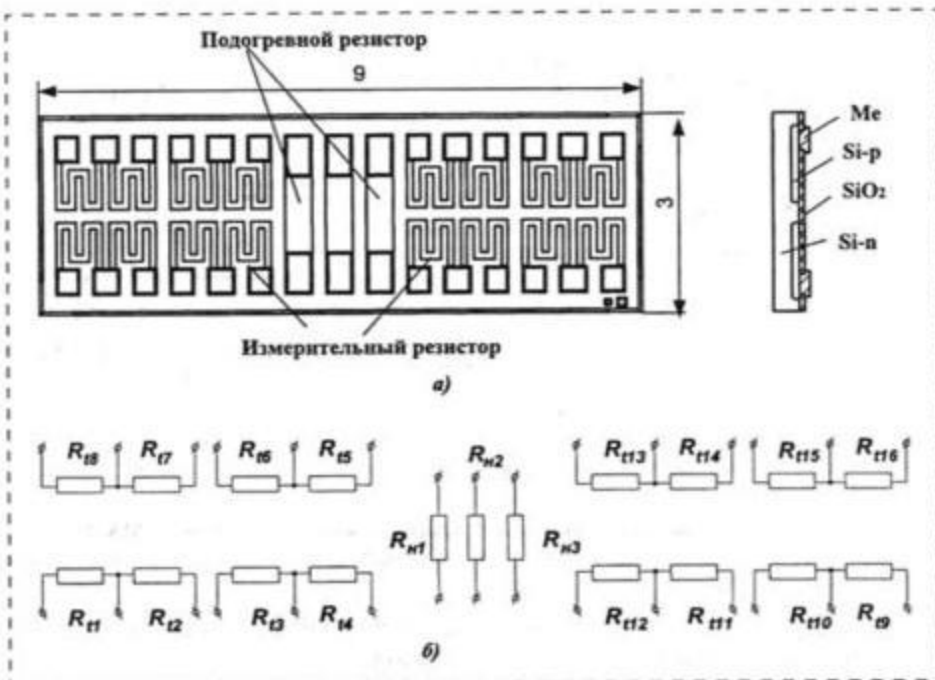


Рис. 1. Кремниевый интегральный микротермоанемометр КМТА-1: а — топология; б — электрическая принципиальная схема

лы тока через нагреватель, так и изменением номинала резистивного нагревателя путем последовательного или параллельного включения резисторов R_{n1} – R_{n3} .

Процесс измерения расхода жидких и газообразных сред сопряжен со значительными динамическими изменениями теплофизических параметров потока. Поэтому для гибкой реализации оптимальных решений необходимо иметь возможность варьирования параметров измерительных схем термоанемометра с учетом вида контролируемой среды и конструктивных особенностей расположения чувствительного элемента относительно измеряемого потока в трубопроводе. Такие возможности открывают использование различных схем включения измерительных терморезисторов, сформированных интегрально в микротермоанемометре КМТА-1.

Применительно к КМТА-1 можно сказать, что наличие представленного набора терморезисторов позволяет реализовать все известные варианты включения измерительного сопротивления в мост Уитстона — один измери-

тельный резистор, полуактивная мостовая схема, активная мостовая схема (рис. 2). Существует также возможность варьирования номиналом плеча мостовой схемы и расположения измерительных резисторов по отношению к нагревателю, что позволяет изменять чувствительность мостовой схемы к перепадам температуры по кристаллу КМТА-1 в заданном диапазоне скоростей потока, а также изменять диапазон скоростей потока при сохранении чувствительности моста.

Кроме того, приведенная на рис. 1 топология дает возможность осуществлять практически любой из методов контроля скорости потока среды, на основе которых функционируют тепловые расходомеры [2, 5, 11], что позволяет применять его для измерения параметров потока сред с различными физическими свойствами и (или) регулирования динамического диапазона измеряемого расхода.

Так, например, существует возможность использования КМТА-1 в качестве калориметрического расходомера [2, 5]. В этом случае

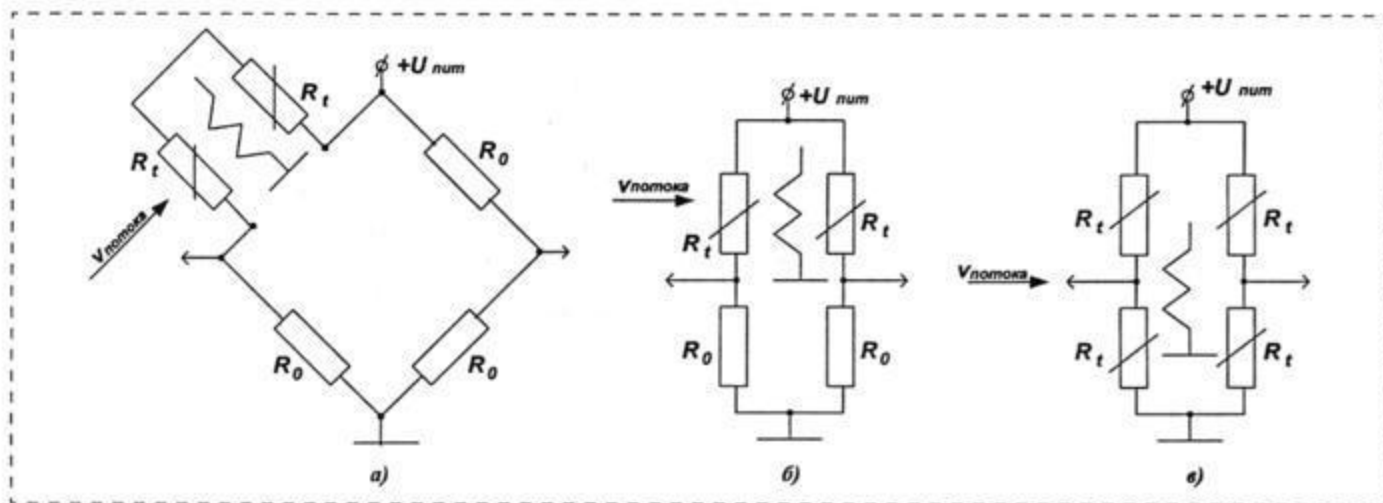


Рис. 2. Варианты мостовых схем включения измерительных резисторов КТМА-1:

а — один измерительный резистор; б — полуактивная мостовая схема; в — активная мостовая схема

тело кристалла микротермоанометра, непосредственно контактирующее с контролируемой средой, можно считать фрагментом стенки трубопровода, содержащей в центральной части нагреватель, а также два (или четыре) терморезистивных измерительных элемента, расположенных до и после нагревателя относительно направления потока. Энергия, выделяющаяся на нагревателе, разогревает кристалл. В условиях нулевого расхода создается симметричный профиль распределения температуры по кристаллу, главным образом за счет теплопроводности в кремнии. При наличии потока теплота передается среде и переносится по направлению потока. Профиль распределения температуры по кристаллу становится несимметричным и перепад температур на измерительных терморезисторах повы-

шается с увеличением массового расхода.

Гидромеханические и тепловые процессы, протекающие при функционировании микротермоанометра, наиболее точно можно описать с помощью уравнений пограничного слоя плоской пластины для несжимаемой (сжимаемой) жидкости [12]. Однако при решении многих практических задач достаточно, как правило, применения хорошо известных функций [5], требующих экспериментального определения некоторых констант. Так, для случая калориметрического расходомера выражение для массового расхода определяется перепадом температур ΔT на измерительных терморезисторах и имеет вид [5]

$$M = \frac{N \Delta T}{K c_p P}, \quad (1)$$

где c_p — удельная теплоемкость среды; P — электрическая мощность нагревателя; K и N — константы, зависящие соответственно от материала сенсорного элемента и геометрической конфигурации трубопровода, а также от физических свойств контролируемой среды.

Данная зависимость в случае ламинарного потока является в определенных пределах линейной. Для КТМА-1, включенного по схеме калориметрического расходомера (схемы включения подогревных и измерительных резисторов соответствуют рис. 3, б и рис. 2), характеристика преобразования скорости потока воздуха представлена на рис. 4, а, кривая 1.

Необходимо отметить, что линейность характеристики сенсорного элемента при измерении расхода жидких сред ограничена

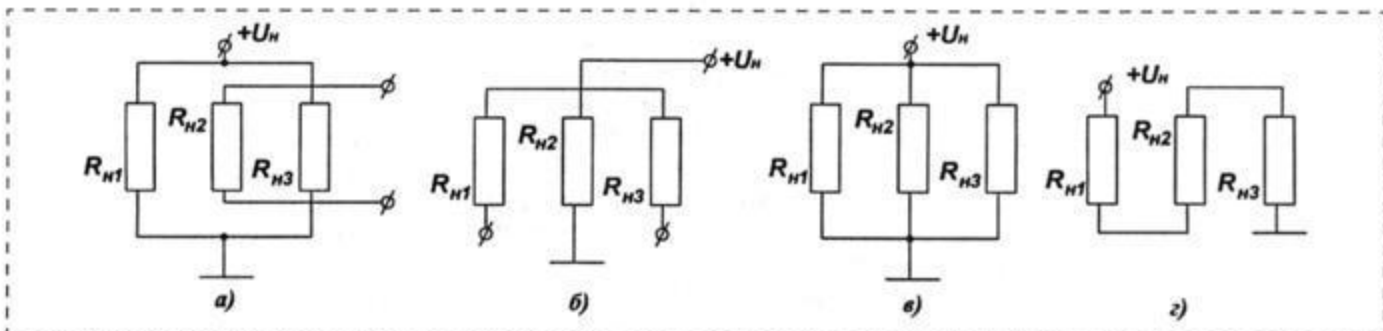


Рис. 3. Электрические принципиальные схемы включения подогревных резисторов КТМА-1

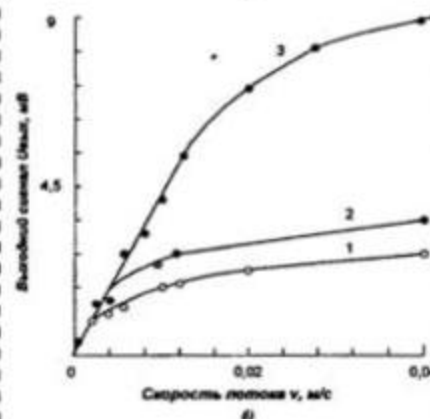
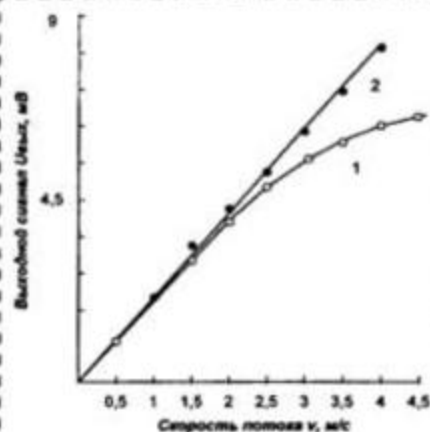


Рис. 4. Характеристика преобразования скорости потока воздуха (а) и воды (б) для КМТА-1, полученная с помощью калориметрического метода измерения:

а — 1 — при фиксированной мощности нагревателя $P_H = 0,8$ Вт; 2 — при регулировке мощности нагревателя $P_H = 0,8 \div 1,2$ Вт для поддержания постоянной температуры разогрева кристалла; б — при фиксированной мощности нагревателя: 1 — $P_H = 0,72$ Вт; 2 — $P_H = 1,25$ Вт; 3 — при регулировке мощности нагревателя $P_H = 0,5 \div 2$ Вт

областью малых значений расхода, что требует применения байпасных устройств. Зависимость выходного сигнала микротермоанемометра, установленного в байпас, от скорости потока воды приведена на рис. 4, б, кривые 1 и 2.

Следующий метод контроля расхода с помощью микротермоанемометра КМТА-1 может быть реализован при включении его подогревных (см. рис. 3) и измерительных (см. рис. 2, а) резистивных элементов по схеме классического термоанемометра или рас-

ходомера потери теплоты [2, 5]. В этом случае температура кристалла поддерживается постоянной, что контролируется с помощью термокомпенсационного резистора, тело которого окружает нагреватель. Непосредственный расход (скорость потока) измеряется с помощью контроля мощности, выделяемой на нагревателе. Характеристика преобразования скорости потока воды и воздуха в электрический сигнал представлена на рис. 5.

Полученная экспоненциальная функция может быть описана с использованием хорошо известного закона Кинга [5]:

$$P = A + BM^{E_x}, \quad (2)$$

где коэффициент B и показатель степени E_x зависят от расхода; A — составляющая выходного сигнала, отражающая потерю теплоты путем свободной конвекции, теплового излучения и теплопроводности к монтажному соединению.

Схема аналогового датчика-расходомера, функционирующего по методу контроля потери теплоты, может быть выполнена в соответствии с рис. 6. Она построена на базе двух операционных усилителей. Нагреватель R_H , являющийся измерительным, и термокомпенсационный резистор R_K , находящиеся на кристалле КМТА-1, включаются в мостовую схему. При соединении одного операционного усилителя 2 с диагональю моста усилитель будет поддерживать равновесие мостовой схемы (нулевой потенциал на входе усилителя), управляя силовым транзистором 3 и меняя, таким образом, силу тока моста. Следовательно, при изменении скорости потока (расхода) температура кристалла останется постоянной, а мост будет в равновесии при любых допустимых скоростях потока. Выходной сигнал измерителя снимается с опорного резистора R_0 , собственный температурный коэффи-

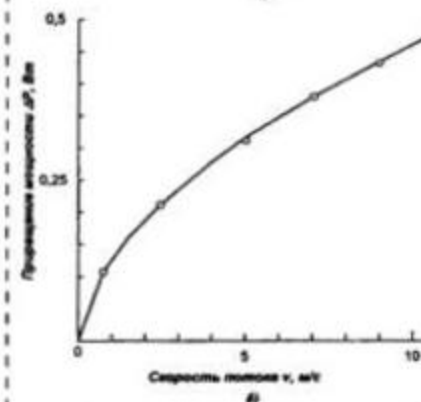
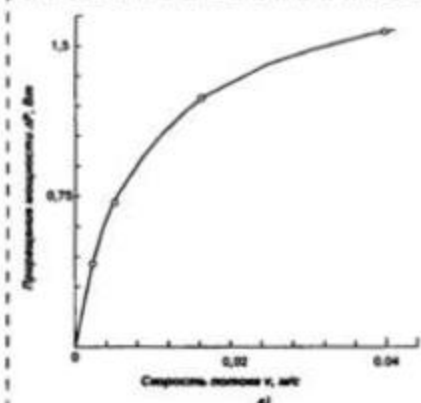


Рис. 5. Характеристика преобразования скорости потока воды (а) и воздуха (б) для КМТА-1, полученная с помощью метода контроля потери теплоты

ент сопротивления которого должен быть как можно меньшим.

Сигнал с опорного резистора R_0 поступает на второй операционный усилитель, который выполняет функции повторителя 4. Установка заданного перегрева ΔT относительно температуры потока осуществляется переменным резистором R_p в процессе настройки схемы. С увеличением перегрева чувствительность термоанемометра возрастает. Подстроечный резистор R_3 предназначен для установки нуля на выходе расходомера.

Отметим также, что существует возможность совмещения двух предыдущих методов измерения скорости потока (расхода) контролируемой среды при использовании микротермоанемометрического сенсорного элемента КМТА-1. В этом случае температура в центре кристалла поддер-

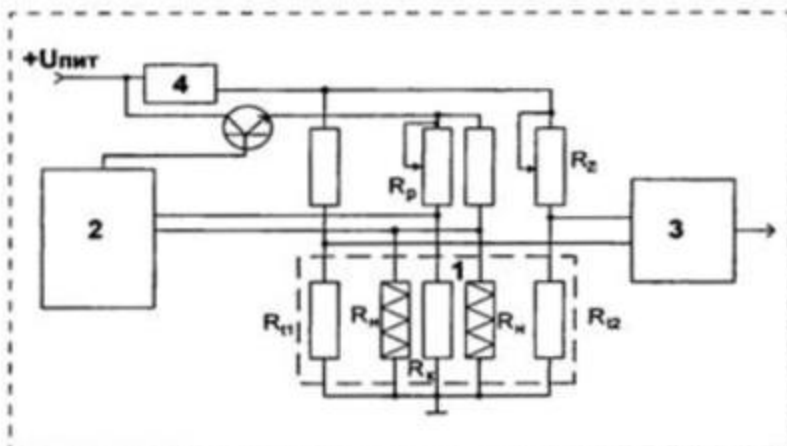
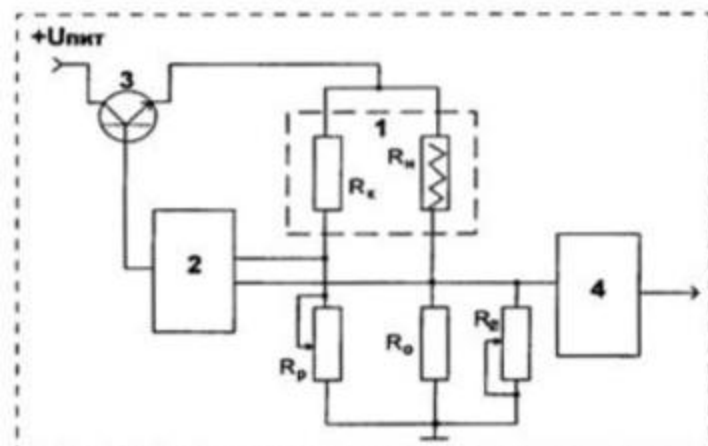


Рис. 6. Схема термоанемометрического расходомера (потери теплоты):

1 — микротермоанемометр КМТА-1; 2 — операционный усилитель; 3 — силовой транзистор; 4 — повторитель

Рис. 7. Схема калориметрического расходомера с фиксированной температурой перегрева:

1 — микротермоанемометр КМТА-1; 2 — термостат; 3 — измерительный усилитель; 4 — стабилизатор напряжения

живается постоянной, а информационным сигналом является сигнал разбаланса мостовой схемы измерительных терморезисторов R_T . При этом подогревные резистивные элементы могут быть включены в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3, а, б; центральный $R_{\eta 2}$ выполняет функцию термокомпенсационного резистора. Измерительные терморезисторы включаются по схеме, показанной на рис. 4, б, в. Данный метод позволяет расширить линейный динамический диапазон характеристики преобразования при калориметрическом измерении скорости потока (рис. 4, а, кривая 2; рис. 4, б, кривая 3), так как устраняет нелинейность, возникающую в результате быстрого охлаждения кристалла.

Схема калориметрического датчика расхода с фиксированной температурой перегрева может быть построена в соответствии с рис. 7.

В данной схеме температура перегрева ΔT кристалла КМТА-1 по отношению к температуре контролируемой среды, устанавливаемая с помощью R_p , поддерживается с помощью термостата 2, а информационный сигнал, линейно пропорциональный скорости потока (расходу), возникающий в результате разбаланса измерительной мостовой схемы

при возникновении разности температур терморезисторов $R_{\eta 1}$ и $R_{\eta 2}$, усиливается измерительным усилителем 3. С помощью резистора R_{Σ} устанавливается нулевой сигнал на выходе расходомера.

Следует отметить, что даже при достаточном усложнении функциональной схемы устройства данный метод тем не менее не позволяет полностью линеаризовать выходную характеристику сенсорного элемента. Поэтому для дальнейшего расширения линейного динамического диапазона измерения расхода можно использовать, например, преобразование аналогового выходного сигнала в частотный [13] с последующей его обработкой в цифровом виде.

Как показано в [8], подавление коррозионных процессов, уменьшающих срок службы прибора, является актуальным и для микроэлектронных термоанемометров, что, вероятнее всего, связано с процессом старения металлических контактов при высоких температурах разогрева кристалла. Для увеличения временной стабильности показаний подобных устройств необходимо руководствоваться, в частности, использованием методов измерения расхода в широком динамическом диапазоне с возможно малым перегревом кристалла.

С этой точки зрения одним из наиболее перспективных приемов контроля скорости потока различных сред в расширенном динамическом диапазоне, по нашему мнению, является метод, представляющий собой разновидность метода контроля потери теплоты, аналогичный описанному в [11]. Данный метод в общем случае заключается в импульсном перегреве кристалла микротермоанемометра относительно потока до невысоких температур ($\sim 10-30^\circ\text{C}$) и измерении времени остывания кристалла до заданной температуры (превышающей или равной температуре контролируемой среды) в зависимости от расхода (скорости потока). В этом случае подогревные резисторы КМТА-1 могут быть включены в соответствии со схемой на рис. 3, в для повышения импульсной мощности нагревателя. Резисторы R_T объединяются в один измерительный терморезистор, окружающий нагреватель (см. рис. 2, а), с помощью которого осуществляется контроль температуры кристалла микротермоанемометра. Для контроля температуры среды необходимо в смежное с терморезистором микротермоанемометра плечо измерительной мостовой схемы включить встроенный в поток выносной терморезистивный элемент (рис. 8).

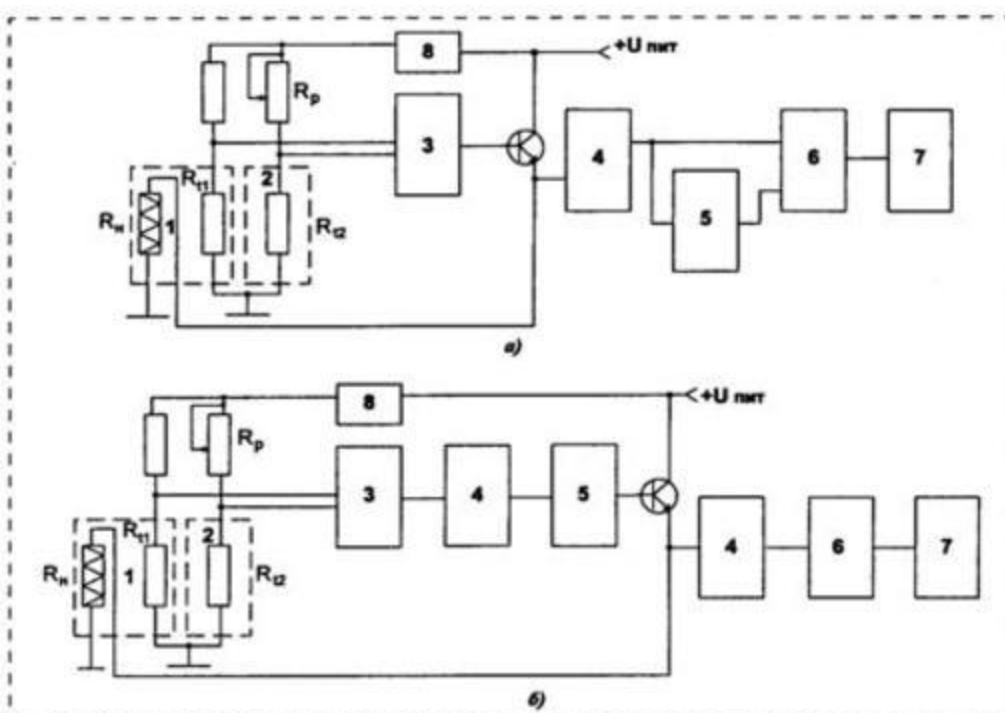


Рис. 8. Варианты схем расходомера, реализующего метод контроля времени остывания термоанемометра:

1 — микротермоанемометр КМТА-1; 2 — выносной терморезистор; 3 — компаратор; 4 — инвертор; 5 — одновибратор; 6 — генератор импульсов; 7 — счетчик импульсов; 8 — стабилизатор напряжения

Схема устройства преобразования сигнала сенсорного элемента в цифровой выходной сигнал может быть построена, например (рис. 8, а), на базе компаратора 3, включенного по схеме терморегулятора, осуществляющего поддержание теплового баланса измерительной мостовой схемы, т. е. температуры перегрева кристалла ΔT относительно температуры среды, генератора 6, формирующего счетные импульсы заданной длительности, а также одновибратора 5, формирующего необходимый временной интервал измерения и счетчика импульсов, регистрирующего интегральное время остывания сенсорного элемента до температуры ΔT в зависимости от скорости контролируемого потока. Установка временного интервала измерения в данном случае необходима для повышения стабильности процесса измерения, осуществляемого с помощью последующего усреднения времени остывания кристалла при постоянном расходе.

Схема, приведенная на рис. 8, б, позволяет контролировать время остывания сенсорного элемента до определенной температуры, превышающей или равной температуре потока после разогрева кристалла импульсом тока заданной длительности. Компаратор 3 в этом случае регистрирует состояние перегрева кристалла микротермоанемометра и осуществляет управление входом одновибратора. Таким образом, при состоянии баланса измерительной мостовой схемы (низкий уровень сигнала на выходе компаратора и соответственно высокий на выходе первого инвертора) одновибратор формирует подогревную импульс заданной длительности, приводящий к разбалансу измерительной схемы и появлению высокого уровня на выходе компаратора. Временной интервал, в течение которого измерительная схема находится в состоянии разбаланса (время остывания сенсорно-

го элемента), является измеряемой величиной. В течение времени остывания микротермоанемометра генератор формирует счетные импульсы, число которых является функцией расхода и регистрируется счетчиком.

На рис. 9 представлена зависимость времени остывания кристалла КМТА-1 до температуры потока после его разогрева токовым импульсом длительностью 1 с от скорости потока воды.

К достоинствам данного метода измерения расхода с использованием конструкции интегрального микротермоанемометрического сенсорного элемента КМТА-1 можно отнести:

- возможность измерения расхода жидких сред в расширенном диапазоне скоростей потока без применения байпасных устройств;
- возможность измерения расхода в условиях изменения температуры контролируемой (и окружающей расходомер) среды, что повышает точность измерения;
- малую температуру перегрева кристалла по отношению к температуре среды, что увеличивает срок службы сенсорного элемента и снижает энергопотребление расходомера;
- предоставление выходного сигнала в цифровом виде, что упрощает процесс его дальнейшей обработки.

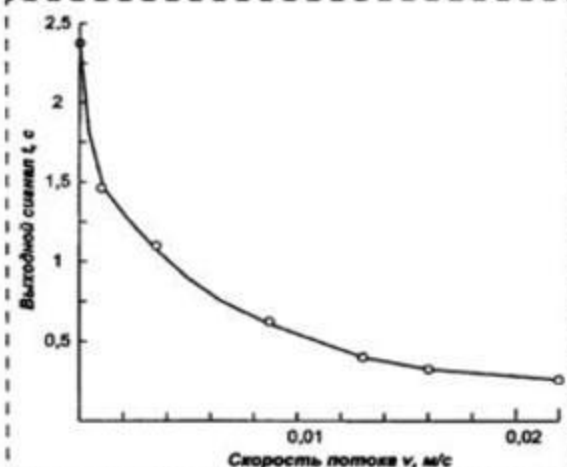


Рис. 9. Характеристика преобразования скорости потока воды для КМТА-1, полученная по методу контроля времени остывания кристалла при импульсном нагреве длительностью 1 с

В целом, по результатам приведенных экспериментальных данных можно отметить, что возможность реализации указанных методов измерения расхода с помощью интегрального кремниевого микротермоанемометра КМТА-1 позволяет с различной степенью эффективности проводить контроль как газообразных, так и жидких сред. Достаточно широкий диапазон измеряемых скоростей потоков (до 10 м/с и более для воздуха; до 0,04 м/с и более — для воды) указывает на возможность реализации на базе КМТА-1 датчиковых устройств, предназначенных для функционирования в автоматических системах управления различного назначения при решении как научно-исследовательских, так и практических задач.

В настоящее время в НИИ МВС ТРТУ проводится ком-

плекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по построению на базе интегрального кремниевого микротермоанемометра КМТА-1 семейства датчиков расхода жидких и газообразных сред с унифицированными выходными сигналами как в аналоговом, так и в цифровом виде.

Список литературы

1. Polischuk T. Flowmetering: New and traditional solutions break new ground // I&CS. November. 1998.
2. Цейтлин В. Г. Техника измерения расхода и количества жидкостей газов и паров // М: Издательство стандартов. 1981. 191 с.
3. Камразе А. Н., Климова О. В., Мышко С. Н., Тимонов С. М. Об измерении малых расходов газов // Приборы и системы управления. 1990. № 2. С. 20.
4. Katz I. M., Shaughnessy E. J. Digital temperature compensation of a thermistor flowmeter // J. Phys. E. Sci. Instrum. 1987. Vol. 20. N 6. P. 561—564.

5. Hohenstatt M. Thermal mass flow sensors for gases // Discharge and Velocity Measurements. 1988. P. 65—73.
6. Грудин О. М., Иванов П. Д., Капан И. И. и др. Микроэлектронный датчик для измерения малых перепадов давления // Приборы и техника эксперимента. 1995. № 2. С. 193—197.
7. Lyman J. How Micro Switch's new kind of air-flow sensor does it // Electron. — 1987. Vol. 60. N 20. P. 85—86.
8. Habokotte E., Apel V., Warkowski F. Interfacing Funktionsblock und Systeme // Elektronik. 1990. № 1. P. 80—87.
9. Van Putten A. Anemometer productions a silicon success story // Sensor Rev. 1989. 9. N1. P. 47—51.
10. Котов В. Н., Черепанин И. И. Твердотельный микротермоанемометр для жидких и газообразных сред // Труды науч.-техн. конф. "Электроника и информатика-2002". М.: МИЭТ. 2002.
11. Сухаревский О. И., Жартовский Д. Н. Математическое моделирование функционирования массового расходомера МР-01 // Приборы и системы. 2001. № 6. С. 56—60.
12. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М: Мир. 1990. 762 с.
13. Асаткани Г. Г., Морозов В. П. Измеритель малых расходов с частотным выходом // Приборы и системы управления. 1999. № 3. С. 28—29.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 681.7.013.82

А. Л. Резник, канд. техн. наук,
В. М. Ефимов, канд. техн. наук,
Институт автоматизации и электротехники СО РАН
(Новосибирск), e-mail: reznik@iae.nsk.su

ПОВЫШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ РЕГУЛИРУЕМОГО СУБПИКСЕЛЬНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Предложен метод, разработан и обоснован конструктивный алгоритм быстрого решения в пространственной области обратной некорректной задачи, связанной с оценением исходного изображения по набору наблюдаемых "смазанных" изображений низкого разрешения, имеющих регулярное координатное смещение.

Введение

Во многих научно-технических областях и практических приложениях информатики возник-

ает необходимость оценивания идеального исходного сигнала (изображения) по результатам измерений, осуществляемых с помощью фотоприемных (фотоматриц) низкого разрешения. Использование фотоматриц с высоким пространственным разрешением часто затруднено высокими ценовыми затратами, а иногда (например, для матриц ИК диапазона) возникающие сложности связаны с технологическими проблемами изготовления таких приемных устройств.

В настоящей статье указанную задачу восстановления исходного сигнала (изображения) с высоким пространственным разрешением предлагается решать с помощью регулируемого субпиксельного сканирования, когда исходный сигнал восстанавливается по набору измерений, каждое из которых получено с помощью траекторного сдвига регистрирующей фотоприемной линейки (фотоматрицы) с дискретностью, меньшей линейных размеров фотоэлемента (линейных размеров интегрирующей апертуры). Таким образом, имея набор цифровых изображений (отсчетов сигнала), сдвинутых одно относительно другого на величину, меньшую линейных размеров интегрирующего элемента фотоматрицы, необходимо с помощью оптимальной

В целом, по результатам приведенных экспериментальных данных можно отметить, что возможность реализации указанных методов измерения расхода с помощью интегрального кремниевого микротермоанемометра КМТА-1 позволяет с различной степенью эффективности проводить контроль как газообразных, так и жидких сред. Достаточно широкий диапазон измеряемых скоростей потоков (до 10 м/с и более для воздуха; до 0,04 м/с и более — для воды) указывает на возможность реализации на базе КМТА-1 датчиковых устройств, предназначенных для функционирования в автоматических системах управления различного назначения при решении как научно-исследовательских, так и практических задач.

В настоящее время в НИИ МВС ТРТУ проводится ком-

плекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по построению на базе интегрального кремниевого микротермоанемометра КМТА-1 семейства датчиков расхода жидких и газообразных сред с унифицированными выходными сигналами как в аналоговом, так и в цифровом виде.

Список литературы

1. Polischuk T. Flowmetering: New and traditional solutions break new ground // I&CS. November. 1998.
2. Цейтлин В. Г. Техника измерения расхода и количества жидкостей газов и паров // М: Издательство стандартов. 1981. 191 с.
3. Камразе А. Н., Климова О. В., Мышко С. Н., Тимонов С. М. Об измерении малых расходов газов // Приборы и системы управления. 1990. № 2. С. 20.
4. Katz I. M., Shaughnessy E. J. Digital temperature compensation of a thermistor flowmeter // J. Phys. E. Sci. Instrum. 1987. Vol. 20. N 6. P. 561—564.

5. Hohenstatt M. Thermal mass flow sensors for gases // Discharge and Velocity Measurements. 1988. P. 65—73.

6. Грудин О. М., Иванов П. Д., Капан И. И. и др. Микроэлектронный датчик для измерения малых перепадов давления // Приборы и техника эксперимента. 1995. № 2. С. 193—197.

7. Lyman J. How Micro Switch's new kind of air-flow sensor does it // Electron. — 1987. Vol. 60. N 20. P. 85—86.

8. Habokotte E., Apel V., Warkowski F. Interfacing Funktionsblock und Systeme // Elektronik. 1990. № 1. P. 80—87.

9. Van Putten A. Anemometer productions a silicon success story // Sensor Rev. 1989. 9. N1. P. 47—51.

10. Котов В. Н., Черепанин И. И. Твердотельный микротермоанемометр для жидких и газообразных сред // Труды науч.-техн. конф. "Электроника и информатика-2002". М.: МИЭТ. 2002.

11. Сухаревский О. И., Жартовский Д. Н. Математическое моделирование функционирования массового расходомера МР-01 // Приборы и системы. 2001. № 6. С. 56—60.

12. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М: Мир. 1990. 762 с.

13. Асаткани Г. Г., Морозов В. П. Измеритель малых расходов с частотным выходом // Приборы и системы управления. 1999. № 3. С. 28—29.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 681.7.013.82

А. Л. Резник, канд. техн. наук,
В. М. Ефимов, канд. техн. наук,
Институт автоматизации и электротехники СО РАН
(Новосибирск), e-mail: reznik@iae.nsk.su

ПОВЫШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ РЕГУЛИРУЕМОГО СУБПИКСЕЛЬНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Предложен метод, разработан и обоснован конструктивный алгоритм быстрого решения в пространственной области обратной некорректной задачи, связанной с оценением исходного изображения по набору наблюдаемых "смазанных" изображений низкого разрешения, имеющих регулярное координатное смещение.

Введение

Во многих научно-технических областях и практических приложениях информатики возник-

ает необходимость оценивания идеального исходного сигнала (изображения) по результатам измерений, осуществляемых с помощью фотоприемных (фотоматриц) низкого разрешения. Использование фотоматриц с высоким пространственным разрешением часто затруднено высокими ценовыми затратами, а иногда (например, для матриц ИК диапазона) возникающие сложности связаны с технологическими проблемами изготовления таких приемных устройств.

В настоящей статье указанную задачу восстановления исходного сигнала (изображения) с высоким пространственным разрешением предлагается решать с помощью регулируемого субпиксельного сканирования, когда исходный сигнал восстанавливается по набору измерений, каждое из которых получено с помощью траекторного сдвига регистрирующей фотоприемной линейки (фотоматрицы) с дискретностью, меньшей линейных размеров фотозлемента (линейных размеров интегрирующей апертуры). Таким образом, имея набор цифровых изображений (отсчетов сигнала), сдвинутых одно относительно другого на величину, меньшую линейных размеров интегрирующего элемента фотоматрицы, необходимо с помощью оптимальной

обработки оценить исходное изображение, добиваясь максимально высокого пространственного разрешения.

Постановка задачи

Задача оценивания исходного изображения в зависимости от применяемого способа регистрации, который в нашем случае описывается двумя характеристиками — траекторией перемещения (сканирования) фотоматрицы и частотой съемки, — возникает в двух вариантах. Один из режимов регистрации приводит к недоопределенной задаче, когда наблюдаемых данных в принципе недостаточно для однозначного восстановления сигнала (изображения), но тем не менее его статистически обоснованную оценку необходимо построить. Многие авторы [1–5], занимающиеся исследованиями в области цифровой обработки сигналов и изображений, для решения такого рода задач разработали математические модели, вычислительные схемы и алгоритмы, адаптация которых к условиям конкретно рассматриваемых прикладных проблем позволяет построить достаточно эффективные схемы их решения. Например, при классическом подходе [6] такую статистически обоснованную оценку обычно получают алгебраическими методами посредством псевдообращения матриц. Получаемое в результате псевдообращения решение имеет ряд достоинств, но также обладает и определенными недостатками. Один из них заключается в том, что решение, получаемое с помощью псевдообращения матриц, в общем случае не сбалансировано (сумма весовых коэффициентов, с которыми входят в решение отсчеты-наблюдения, различна для различных элементов формируемого сигнала-изображения), а это ведет к увеличению дисперсии восстанавливаемого поля, что не всегда приемлемо. Проще всего недостаток такого решения продемонстрировать на самом тривиальном примере одномерного сигнала.

Допустим, требуется по результатам двух измерений I_1 и I_2 , значение каждого из которых формировалось как суммарный сигнал в двух смежных пикселях (I_1 — суммарный сигнал в первом и втором оцениваемых пикселях, а I_2 , соответственно, — суммарный сигнал во втором и третьем пикселях), оценить амплитуду сигнала $f(t)$ в трех точках-пикселях: $x_1 = f(t_1)$, $x_2 = f(t_2)$, $x_3 = f(t_3)$. Итак, по результатам наблюдений имеем систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = I_1; \\ x_2 + x_3 = I_2. \end{cases} \quad (1)$$

Сигналов, удовлетворяющих системе уравнений (1), бесконечно много (одномерное линейное под-

пространство), но классическое решение по методу псевдообращения единственно и выглядит так:

$$\begin{cases} x_1 = f(t_1) = \frac{2}{3}I_1 - \frac{1}{3}I_2; \\ x_2 = f(t_2) = \frac{1}{3}I_1 + \frac{1}{3}I_2; \\ x_3 = f(t_3) = -\frac{1}{3}I_1 + \frac{2}{3}I_2. \end{cases} \quad (2)$$

Из всех решений, удовлетворяющих системе уравнений (1), это решение отличается тем, что его норма

$$\|x\| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \quad (3)$$

минимальна.

Недостаток же, о котором уже говорилось, — несбалансированность суммы коэффициентов для различных элементов сигнала-решения: для элементов x_1 и x_3 эта сумма равна $(1/3)$, а для элемента x_2 она равна $(2/3)$. Как следствие этого, у такого решения будет завышенная дисперсия, т. е., вообще говоря, можно найти более "гладкое" решение, удовлетворяющее системе наблюдений (1). Например, если результаты наблюдений совпадают ($I_1 = I_2 = I_0$), то статистически обоснованной и интуитивно достоверной в рассматриваемом простейшем одномерном случае представляется оценка с нулевой дисперсией, не нарушающая симметрии наблюдений, а именно:

$$x_1 = x_2 = x_3 = \frac{1}{2}I_0, \quad (4)$$

в то время как классическое решение (2) в этом случае дает результат

$$\begin{cases} x_1 = \frac{1}{3}I_0; \\ x_2 = \frac{2}{3}I_0; \\ x_3 = \frac{1}{3}I_0 \end{cases} \quad (5)$$

с завышенной дисперсией.

В данной работе нами предлагается вместо псевдообращения матриц, приводящего к решению с минимальной нормой, искать решение, которое, с одной стороны, удовлетворяет системе наблюдений вида (1), а с другой стороны, имеет минимальную энергию (дисперсию), которая в рассматриваемом нами простейшем случае выражается следующим образом:

$$D_x = \frac{(x_1 - \langle x \rangle)^2 + (x_2 - \langle x \rangle)^2 + (x_3 - \langle x \rangle)^2}{2}, \quad (6)$$

где $\langle x \rangle$ — среднее значение амплитуды восстановленного сигнала: $\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}$.

В частности, для системы наблюдений (1) решение с минимальной энергией (дисперсией) не сложно получить прямым расчетом, и выглядит оно так:

$$\begin{cases} x_1 = f(t_1) = \frac{3}{4}I_1 - \frac{1}{4}I_2; \\ x_2 = f(t_2) = \frac{1}{4}I_1 + \frac{1}{4}I_2; \\ x_3 = f(t_3) = \frac{1}{4}I_1 + \frac{3}{4}I_2. \end{cases} \quad (7)$$

Следует подчеркнуть, что решение с минимальной дисперсией и в одномерном, и в двумерном случае обладает симметрией и не сдвигает среднего значения сигнала. При увеличении числа отсчетов одномерного сигнала, а также при переходе к двумерному сигналу (изображению) поиск решения, минимизирующего дисперсию, усложняется, так как нужно заботиться не только о том, чтобы корректно составить систему уравнений для расчета экстремума, но и избежать другого недостатка, присущего классическому методу псевдообращения, — необходимости вычисления обратных матриц сверхбольшой размерности уже при сравнительно малых размерах восстанавливаемого поля. В представляемой работе эта трудность обходится следующим образом. С учетом ограничений, накладываемых системой уравнений (наблюдений) вида (1), все элементы восстанавливаемого поля выражаются через окаймляющие элементы, что сокращает размерность решаемой задачи с $M \times N$ до $(M + N - l + 1) \times (l - 1)$, где M, N — линейные размеры восстанавливаемого поля, l — линейный размер интегрирующей апертуры. Далее рассчитывается дисперсия восстанавливаемого поля как функция, зависящая от амплитуды окаймляющих элементов. Затем путем приравнивания нулю частных производных полученной функции по каждому из переменных получается стандартная (число уравнений совпадает с числом неизвестных) невырожденная система линейных уравнений для нахождения окаймляющих элементов реконструируемого изображения, а следовательно, и для всего изображения в целом. Достоинством такого подхода является также то, что все необходимые расчеты

для восстановления изображений с повышенным пространственным разрешением при заданных размерах поля и заданных размерах сканирующей апертуры проводятся однократно, а итоговые оценки для всех элементов конкретного восстанавливаемого поля получаются с помощью процедур умножения матриц (векторов) наблюдений на заранее рассчитанные матрицы-шаблоны, что не требует серьезных вычислительных затрат. Кроме того, при таком подходе не возникает краевых эффектов, и восстановление граничных элементов происходит по абсолютно той же схеме, что и восстановление внутренних элементов поля.

Восстановление цифрового сигнала с минимальной дисперсией (одномерный случай)

Как уже отмечалось в постановочной части, задачи нахождения сигнала с минимальной нормой и сигнала с минимальной дисперсией, решаемые на основе одних и тех же наблюдаемых данных, полученных в результате субпиксельного сканирования исходного изображения с помощью фотоаппаратуры низкого разрешения, вообще говоря, имеют не совпадающие между собой решения.

Покажем, что при соблюдении определенных условий на линейные размеры восстанавливаемого поля эти решения совпадают, и приведем конструктивный алгоритм ускоренной реконструкции такого сигнала, не требующий, в отличие от классического подхода, обращения сверхбольших матриц.

Рассмотрим схему сканирования, приведенную на рис. 1. Здесь число восстанавливаемых элементов N кратно числу элементов разрешения l , попадающих в интегрирующую апертуру, т. е. размер поля (в нашем одномерном случае — размер интервала) сканирования в целое число раз превосходит размер апертуры: $N = n \times l$.

Имеем систему наблюдений

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + \dots + x_l = I_1; \\ x_2 + x_3 + \dots + x_{l+1} = I_2; \\ \vdots \\ x_{(n-1)l+1} + x_{(n-1)l+2} + \dots + x_{nl} = I_{(n-1)l+1}. \end{cases} \quad (8)$$

Нетрудно видеть, что в этом случае среднее значение сигнала

$$\begin{aligned} \langle x \rangle &= \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} = \frac{(x_1 + \dots + x_l) + (x_{l+1} + \dots + x_{2l}) + \dots + (x_{(n-1)l+1} + \dots + x_{nl})}{N} = \\ &= \frac{I_1 + I_2 + \dots + I_{(n-1)l+1}}{N} \end{aligned} \quad (9)$$

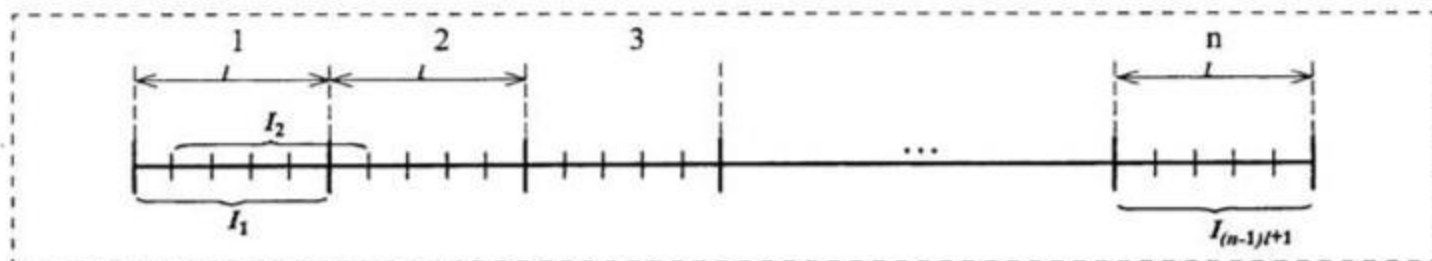


Рис. 1. Схема сканирования одномерного сигнала

является константой, выражающейся через элементы вектора наблюдений I и не зависящей от переменных x_i . Теперь, используя (9), можно непосредственно доказать, что поиск решения, минимизирующего норму, эквивалентен поиску решения, минимизирующего дисперсию.

Напомним, что при поиске решения с минимальной нормой должно минимизироваться выражение

$$\|x\|^2 = \sum_{i=1}^N x_i^2 \Rightarrow \min. \quad (10)$$

Аналогично запишем и преобразуем выражение для дисперсии

$$\begin{aligned} D_y &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2 = \\ &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i^2 - 2\langle x \rangle x_i + \langle x \rangle^2) = \\ &= \frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \right) - \\ &- \frac{1}{N-1} \frac{(I_1 + I_{l+1} + I_{2l+1} + \dots + I_{(n-1)l+1})^2}{N} = \\ &= \frac{1}{N-1} \|x\|^2 - \text{const.} \end{aligned} \quad (11)$$

Полученное выражение отличается от соотношения (10) лишь постоянным множителем и дополнительным слагаемым, не зависящим от переменных x_i , поэтому задачи (11) и (10) имеют одно и то же решение. Таким образом, при размерах восстанавливаемого поля $N = n \times l$ задача минимизации нормы решения (10) и задача минимизации его дисперсии (11) полностью эквивалентны.

Для нахождения этого решения сделаем следующее. Зафиксируем свободные переменные $x_1, \dots, x_{l-1}$ и, используя соотношения (8), выразим через них остальные переменные $x_l, x_{l+1}, \dots, x_N$:

$$\begin{cases} x_l = I_1 - x_1 - \dots - x_{l-1}; \\ x_{l+1} = x_1 + (I_2 - I_1); \\ x_{l+2} = x_2 + (I_3 - I_2); \\ \vdots \\ x_{2l-1} = x_{l-1} + (I_l - I_{l-1}); \\ x_{2l} = I_1 - x_1 - \dots - x_{l-1} + (I_{l+1} - I_l); \\ x_{2l+1} = x_1 + (I_2 - I_1) + (I_{l+2} - I_{l+1}); \\ x_{2l+2} = x_2 + (I_3 - I_2) + (I_{l+3} - I_{l+2}); \\ \vdots \\ x_{3l-1} = x_{l-1} + (I_1 - I_{l-1}) + (I_{2l} - I_{2l-1}); \\ x_{3l} = I_1 - x_1 - \dots - x_{l-1} + (I_{l+1} - I_l) + \\ + (I_{2l+1} - I_{2l}); \\ \vdots \\ x_{(n-1)l+1} = x_1 + (I_2 - I_1) + (I_{l+2} - I_{l+1}) + \\ + \dots + (I_{(n-2)l+2} - I_{(n-2)l+1}); \\ x_{2l+2} = x_2 + (I_3 - I_2) + (I_{l+3} - I_{l+2}) + \\ + \dots + (I_{(n-2)l+3} - I_{(n-2)l+2}); \\ \vdots \\ x_{nl-1} = x_{l-1} + (I_1 - I_{l-1}) + (I_{2l} - I_{2l-1}) + \\ + \dots + (I_{(n-1)l} - I_{(n-1)l-1}); \\ x_{nl} = I_1 - x_1 - \dots - x_{l-1} + (I_{l+1} - I_l) + \\ + (I_{2l+1} - I_{2l}) + \dots + (I_{(n-1)l+1} - I_{(n-1)l}). \end{cases} \quad (12)$$

Подставляя (12) в (10) и приравнявая нулю частные производные полученного выражения по переменным $x_1, \dots, x_{l-1}$, найдем набор из $(l-1)$ соотношений

$$\begin{aligned} nx_1 + nx_2 + \dots + 2nx_i + \dots + nx_{l-1} &= \\ &= nI - [(n-1)(I_{l+1} - I_l) + (n-2) \times \\ &\times (I_{l+2} - I_{l+1}) + \dots + 1 \times (I_{(n-2)l+1} - \\ &- I_{(n-2)l})] + [(n-1)(I_{l+1} - I_l) + \\ &+ (n-2)(I_{2l+1} - I_{2l}) + \dots + 1 \times (I_{(n-1)l+1} - \\ &- I_{(n-1)l})], \quad i = 1, \dots, l-1, \end{aligned} \quad (13)$$

или после несложных преобразований

$$\begin{aligned}
 nx_i = nx_1 - \{ & (n-1)[(I_{l+1} - I_l) - (I_2 - I_1)] + \\
 + (n-2)[& (I_{l+1} - I_{l+1}) - (I_{l+2} - I_{l+1})] + \dots \\
 \dots + 1 \times & [(I_{(n-2)l+i+1} - I_{(n-2)l+i} - \\
 - (I_{(n-2)l+2} - & I_{(n-2)l+1})]\}, \\
 i = 2, \dots, l-1. & \quad (14)
 \end{aligned}$$

Последовательно применяя последнее соотношение (14) к переменным $x_2, \dots, x_{l-1}$ и подставляя затем полученные выражения в первое из уравнений системы (13), найдем решение для элемента x_1 :

$$\begin{aligned}
 x_1 = \left[\frac{2n-1+(l-2)(n-1)}{nl} \right] I_1 + \left[-\frac{n-1}{n} \right] I_2 + \\
 + \left[\frac{1}{nl} \right] I_{(n-1)l+1} + \sum_{i=1}^{n-2} \left\{ \left[\frac{(n-i-1)l+1}{nl} \right] I_{il+1} + \right. \\
 \left. + \left[-\frac{n-i-1}{n} \right] I_{il+2} \right\}. \quad (15)
 \end{aligned}$$

Далее из (14) находим решение для элементов $x_2, \dots, x_{l-1}$:

$$\begin{aligned}
 x_i = x_1 - \frac{1}{n} \sum_{s=0}^{n-2} (n-s-1) [(I_{sl+i+1} - I_{sl+i}) - \\
 - (I_{sl+2} - I_{sl+1})], \\
 i = 2, \dots, l-1. \quad (16)
 \end{aligned}$$

И, наконец, используя (8), последовательно получаем решение для всех остальных элементов фотолинки:

$$x_j = I_{j-l+1} - \sum_{q=j-l+1}^{j-1} x_q, \quad j = l, \dots, N. \quad (17)$$

Восстановление изображения с минимальной дисперсией (двумерный случай)

Задача восстановления двумерного поля, обладающего минимальной дисперсией, по набору смещенных друг относительно друга изображений низкого разрешения формулируется следующим образом.

Требуется построить оценку для элементов изображения $X = (x_{mn})$, которая удовлетворяла бы следующим условиям:

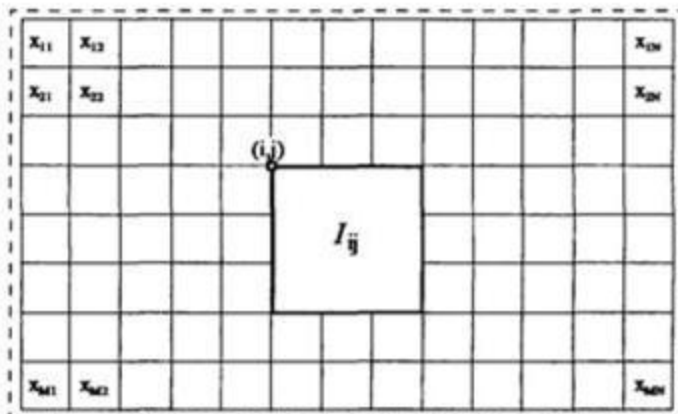


Рис. 2. Схема сканирования поля размером $M \times N$ элементов интегрирующей апертурой $l \times l$

$$\begin{aligned}
 1) \sum_{p=i}^{i+l-1} \sum_{q=j}^{j+l-1} x_{pq} = I_{ij}, \quad i = 1, \dots, M-l+1; \\
 j = 1, \dots, N-l+1; \\
 2) \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N (x_{pq} - \langle x \rangle)^2 \Rightarrow \min, \quad (18)
 \end{aligned}$$

$$\text{где } \langle x \rangle = \frac{1}{MN} \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N x_{pq}.$$

В дискретном случае (рис. 2) для восстановления поля $X = (x_{mn})$, $m = 1, \dots, M$; $n = 1, \dots, N$, по наблюдаемым данным, представляющим собой матрицу $I = (I_{ij})$, $i = 1, \dots, M-l+1$; $j = 1, \dots, N-l+1$, при условии, что размеры поля кратны линейному размеру l интегрирующей апертуры, т. е. когда $M = ml$ и $N = nl$, решение находится с помощью факторизации путем двукратного последовательного применения описанной выше одномерной процедуры.

Для этого сначала формируются новые векторы $y_j = (y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jM})$, $j = 1, \dots, N-l+1$:

$$y_{jk} = \sum_{r=1}^l x_{k,j+r-1}, \quad k = 1, \dots, M, \quad (19)$$

а далее для каждого из $j = 1, \dots, N-l+1$ решается одномерная задача (по уже описанному алгоритму):

$$\begin{aligned}
 1) \sum_{i=1}^l y_{j,k+i-1} = I_{kj}, \quad k = 1, \dots, M-l+1; \\
 2) \sum_{i=1}^M (y_{ji} - \langle y_j \rangle)^2 \Rightarrow \min, \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\text{где } \langle y_j \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_{ji}.$$

В заключение, когда найдены все элементы решения (20) по "столбцам", т. е. определены все переменные y_{jk} ($j = 1, \dots, N - l + 1$; $k = 1, \dots, M$), восстановление исходного поля происходит в результате независимого решения M одномерных задач для каждого $k = 1, \dots, M$:

$$\begin{aligned} 1) \sum_{r=1}^l x_{k,j+r-1} &= y_{jk}, \\ j &= 1, \dots, N - l + 1; \\ 2) \sum_{q=1}^N (x_{kq} - \langle x_k \rangle)^2 &\Rightarrow \min, \end{aligned} \quad (21)$$

где $\langle x_k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N x_{kq}$.

Изложенный метод проверен на большом числе реальных и искусственно сгенерированных контрольных цифровых изображений. Продemonстрировано высокое качество восстановления на подавляющем большинстве тестовых изображений. Отметим, что повышение пространственного разрешения восстанавливаемого изображения по сравнению с пространственным разрешением наблюдаемых изображений требует квадратичного увеличения числа измерений, но эта трудность не является решающей по двум причинам: во-первых, время восстановления изображений объемом 512×512 элементов на персональных ЭВМ средней производительности не превышает нескольких секунд, а, во-вторых, при выполнении расчетов на спецвычислителях матрицы-шаблоны, необходимые для проведения всех требуемых математических операций, могут быть рассчитаны заранее, что существенно снижает вычислительную емкость алгоритмов. Примеры восстановления изображений в соответствии с описанной методикой приведены на рис. 3 и рис. 4, 5 (см. третью сторону обложки).

Заключение

Развитие приведенной в настоящей статье методики повышения пространственного разрешения "смазанных" изображений, сдвинутых одно относительно другого, проводится нами в нескольких направлениях. Рассматривается задача, когда

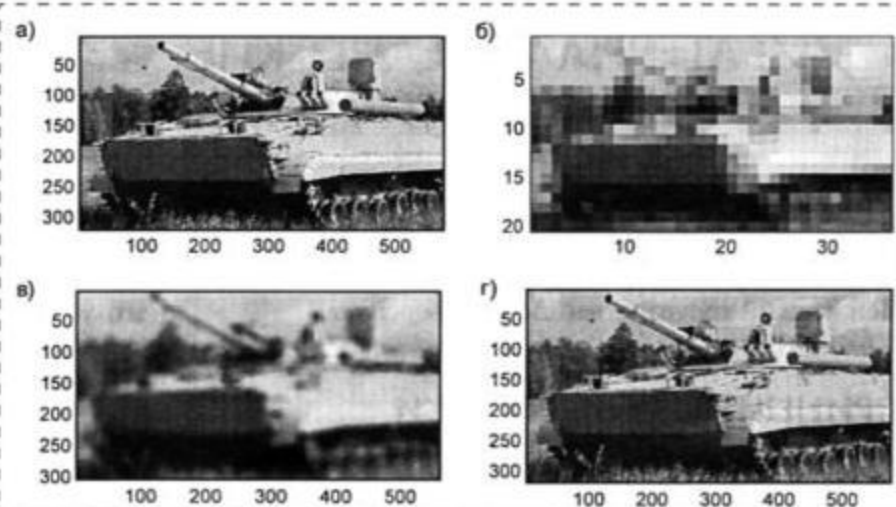


Рис. 3. Пример восстановления исходного объекта:

a — исходное изображение (320×576) элементов, $\sigma_a^2 = 5616.1836$; b — пример одного из наблюдаемых изображений низкого разрешения, апертюра интегрирования (16×16); c — соответствующая изображению a матрица-свертка (набор грубых наблюдений); d — восстановленное изображение с минимальной дисперсией, $\sigma_d^2 = 5561.1577$.

Дисперсия разности восстановленного и исходного изображений $\sigma_{a-d}^2 = 55.0259$

апертюра интегрирования неоднородна. Также достигнуты обнадеживающие результаты в построении оптимальных алгоритмов обработки для произвольных размеров восстанавливаемого поля. Это позволит успешно применять разработанную методику на практике при проектировании оптико-электронных приборов и систем для повышения их пространственного разрешения исключительно алгоритмическими средствами.

Список литературы

1. Peleg Sh., Keren D. and Schweitzer L. Improving Image Resolution Using Subpixel Motion // Pattern Recognition Letters. 1987. 5. P. 223—226.
2. Choi H. and Munson D. C. Analysis and Design of Minimax-Optimal Interpolators // IEEE Transactions on Signal processing. 1998. Vol. 46. N 6, June. P. 1571—1579.
3. Stromer Th. Computationally Attractive Recognition of Bandlimited Images from Irregular Samples // IEEE Transactions on Signal processing. 1997. Vol. 6. N. 4, April. P. 540—548.
4. Marvasti F. Nonuniform Sampling // Advanced Topics in Shannon Sampling and Interpolation Theory / R. J. Marks, II, Ed. New York: Springer-Verlag. 1993. P. 121—156.
5. Yen J. L. On Nonuniform Sampling of Bandlimited Signals // IRE Trans. Circuit Theory. Dec. 1956. Vol. CX-3. P. 251—258.
6. Pratt W. K. Digital Image Processing. New York. John Wiley and Sons. 1978.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 621.382

В. А. Васильев, канд. физ.-мат. наук,
Пензенский государственный университет,
г. Пенза

ПРИНЦИПЫ СИНЕРГЕТИКИ И ПРОЯВЛЕНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В СТРУКТУРАХ ИОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Исследовано развитие нового междисциплинарного направления — синергетики (науки о самоорганизации открытых эволюционирующих систем). Определены и конкретизированы принципы, задачи и предмет исследования синергетики. Установлены сформировавшиеся направления синергетических исследований. Выявлены необходимые и достаточные условия, при которых возможна самоорганизация в системе. Сформулированы основные признаки, по которым системе можно отнести к объекту исследования синергетики, и в которой возможны самоорганизация, упорядочение, уменьшение энтропии, а также эволюция. Рассмотрены твердые растворы полупроводников, легированных различными примесями, и исследовано проявление взаимодействия элементов систем и их самоорганизация на макроуровне. Изучено взаимодействие элементов решетки твердотельной структуры и свободных носителей заряда с использованием относительно несложной модели.

Развитие и совершенствование современных приборов и систем идет по направлениям совершенствования структур, элементной базы, алгоритмов и методов обработки сигналов [1–6]. Независимо от типа систем они имеют определенную общность в механизмах управления. Система может иметь управляющие центры для самоорганизации и не иметь их, при этом быть самоорганизующейся. Первый тип систем является предметом изучения кибернетики, системы без управляющих центров со стихийной самоорганизацией изучает синергетика.

Как известно, синергетика происходит от греческого слова *synergetikos* (совместный, согласованный действующий). Самим названием подчеркивается, что синергетика изучает согласованное функционирование частей, отражающееся в поведении системы как целого. Научный термин "синергетика" ввел Г. Хакен [7] для обозначения междисциплинарного направления, основанного на результатах его исследований по теории лазеров и неравновес-

ным фазовым переходам. По сути, синергетика открыла новое направление в науке, связанное с изучением закономерностей пространственно-временного упорядочения в самых разнообразных системах. Целью провозглашенной науки было дать идейную основу для плодотворного взаимосодействия исследователей из различных областей знания. До Хакена говорили о синергии лишь в частных примерах. Так, Ч. Шеррингтон под термином "синергетическое" подразумевал согласованное действие нервной системы при управлении мышечными движениями [8].

По определению Г. Хакена: "Синергетика занимается изучением систем, состоящих из многих подсистем самой различной природы, таких, как электроны, атомы, молекулы, клетки, нейроны, механические элементы, фотоны, органы, животные и даже люди" [7]. Причем синергетика — теория самоорганизующихся систем. Хакеном высказано мнение о том, что существуют общие принципы, управляющие возникновением самоорганизующихся структур и (или) функций.

В работе [9] Г. Хакен пишет: "Полезно иметь какое-нибудь подходящее определение самоорганизации. Мы называем систему самоорганизующейся, если она без специфического воздействия извне обретает какую-то пространственную, временную и функциональную структуру. Под специфическим воздействием мы понимаем такое, которое навязывает системе структуру или функционирование. В случае же самоорганизации система испытывает неспецифическое воздействие. Например, жидкость, подогреваемая снизу, совершенно равномерно обретает в результате самоорганизации макроструктуру, образуя шестиугольные ячейки". По Г. Хакену самоорганизация — "спонтанное образование высокоупорядоченных структур из зародышей или даже из хаоса", спонтанный переход от неупорядоченного состояния к упорядоченному за счет совместного, кооперативного (синхронного) действия подсистем, элементов. Процесс самоорганизации обычно характеризуется локальным уменьшением энтропии (наблюдается упорядочение) системы за счет экспорта энтропии в окружающую среду (открытая система).

Понятие структуры противоположно понятию хаоса как состоянию, полностью лишенному всякой структуры. Однако и хаос может быть различным, иметь разную степень упорядоченности, разную структуру. Сенсационным открытием Лорен-

ца стало обнаружение сложного поведения сравнительно простой динамической системы из трех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с квадратичными нелинейностями [7]. Оказалось, что при определенных значениях параметров траектория системы ведет себя так запутанно, что со стороны можно принять ее характеристики за случайные. Странный аттрактор Лоренца был всесторонне изучен физиками и математиками. Выяснилось, что система Лоренца способна описывать самые различные физические ситуации — от тепловой конвекции в атмосфере до взаимодействия бегущей электромагнитной волны с инверсно-заселенной двухуровневой средой (рабочим телом лазера) [10]. Слово "странный" подчеркивает два свойства аттрактора: первое — необычность его геометрической структуры, которая не может быть представлена в виде геометрических элементов целой размерности (кривых или плоскостей); второе — образование притягивающей области для траекторий из окрестных областей (траектории внутри странного аттрактора динамически неустойчивы). Также было установлено, что аттрактор Лоренца является одним из фракталов. Фракталами обычно называют множества, которые обладают масштабной инвариантностью, т. е. в любом масштабе они выглядят практически одинаково. Термин "фрактал" был введен Мандельбротом и означает множество, размерность которого не совпадает с обычной размерностью. Размерность является основной геометрической характеристикой фракталов и указывает на близость таких множеств к регулярным объектам. Мандельброт предложил использовать фрактал в качестве меры "нерегулярности" (изрезанности, извилистости и т. п.) и применить дробную размерность, предложенную Безиковичем и Хаусдорфом [11]. Разность между размерностью Безиковича—Хаусдорфа и евклидовой размерностью служит мерой отличия геометрических образов от регулярных геометрических объектов (кривых, поверхностей, тел).

Существенным дополнением к синергетике Хакена [7, 9, 12] явилась теория диссипативных структур [13, 14], разработанная в контексте учения о времени брюссельскими учеными под руководством И. Пригожина. В ней развит термодинамический подход к самоорганизации. Название диссипативные структуры получили новые состояния открытых систем, обменивающихся с окружающей средой потоками вещества или энергии; эти состояния возникают при потере устойчивости из однородного состояния равновесия и необратимом переходе в неоднородное стационарное состояние, устойчивое относительно малых возмущений. Термин диссипативные структуры является более специальным понятием. Г. Хакен под структурой понимает состояние, возникающее в

результате когерентного (согласованного) поведения большого числа частиц.

Свойства диссипативных структур во многих нелинейных системах широко исследованы [13–18]. Были созданы нелинейные модели, в которых используются величины, характерные для термодинамики (концентрации, температуры и т. д.). Одной из самых известных математических моделей синергетики явилась модель брюсселятора [13], которая описывает распределение в пространстве и изменение со временем реагентов относительно узкого класса химических реакций. Ценность модели брюсселятора заключается в том, что она отражает общие черты многих систем, где возникают структуры и возможны явления самоорганизации. При ее исследовании были выяснены свойства диссипативных структур во многих нелинейных системах. Теория диссипативных структур существенно расширила синергетику и представление о ней как о новом научном мировоззрении.

Начиная с Г. Хакена, синергетика действительно стала основой для новых идей в теории лазеров и термодинамике неравновесных процессов, теории автоволновых процессов и нелинейных колебаний; в теории структурной устойчивости и теории бифуркаций; в теории катастроф. Существенно расширилась область применения синергетики в связи с развитием теории фракталов. В контексте синергетики нашли свою интерпретацию и решение многие проблемы в различных областях исследований.

С синергетикой ассоциируются такие физические явления и объекты как: самоорганизация (когерентная, континуальная и другая), открытые системы, неравновесные состояния, аттракторы, бифуркации, динамический хаос и детерминированный хаос, фракталы, диссипативные структуры. Идеи синергетики находят воплощение почти во всех областях науки, а сама синергетика претендует на роль новой парадигмы (греч. *paradeigma* — пример, образец) естествознания и всей современной, постнеклассической науки.

В настоящее время синергетика объединяет различные направления исследований в различных науках — в физике, математике, социологии, экономике, биологии, химии, антропологии и др. [19–28]. Обычно сложные самоорганизующиеся открытые системы являются предметом исследования синергетики, причем основное внимание уделяется внутренним свойствам как источнику саморазвития. Следует заметить, что понятие самоорганизации возникло в кибернетике, а понятие открытой системы — в общей теории систем. Как правило, синергетика имеет дело с процессами, в которых целое обладает свойствами, которых нет ни у одной из частей, т. е. с системными свойствами. В отличие от традиционных областей науки

синергетика исследует общие закономерности эволюции (развития во времени) систем любой природы. Синергетика формирует представление об альтернативности путей развития сложных систем и открывает новые принципы управления ими.

Специалисты разных областей выделяют в качестве главных признаков синергетики то, что характерно для их специализации из того, чем они занимаются. Четкие и однозначные общие признаки синергетики в литературе отсутствуют. Встречаются такие признаки как самоорганизация, прогрессивная эволюция, когерентность взаимодействия, фрактальность структуры, бифуркация и другие. Наибольшими приверженцами синергетики являются группы специалистов, занимающихся нелинейной динамикой, теорией диссипативных структур, лазерной физикой, материаловедением. За последние десятилетия устойчиво сформировались следующие направления синергетических исследований:

- теория лазеров и неравновесных фазовых переходов, основы синергетики (Г. Хакен) [7, 9, 12];
- теория диссипативных структур (И. Пригожин и др.) [13–18];
- детерминированный хаос и фракталы (Б. Мандельброт и др.) [11, 29–32];
- теория катастроф (Р. Том, В. Арнольд и др.) [33, 34];
- динамическая теория информации (Д. С. Чернавский) [37];
- теория неустойчивости в моменты обострений (А. А. Самарский, С. П. Курдюмов, Г. Г. Малинецкий и др.) [38–43];
- самоорганизация каталитических систем (А. П. Руденко) [44–48].

Известные работы в области синергетики говорят о том, что большинство ученых, включая основоположника Г. Хакена, под синергетикой понимают науку о самоорганизации открытых эволюционирующих систем [7–58]. Анализ открытых систем показывает, что не всякая система способна к самоорганизации. Условия, при которых возможна самоорганизация в системе, следующие:

- 1) система должна находиться в неравновесном состоянии;
- 2) наличие положительной обратной связи;
- 3) наличие флуктуаций подсистем и элементов;
- 4) достижение системой критических состояний.

Признаки, по которым систему можно отнести к объекту исследования синергетики и в которой возможна самоорганизация, упорядочение, уменьшение энтропии, а также эволюция:

- открытость (незамкнутость) системы, т. е. система должна иметь возможность обмена энергией, веществом с внешней средой (с надсистемой);
- достаточность свободы подсистем и элементов;

- возможность перехода подсистем и элементов из равновесного состояния в неравновесные состояния;
- возможность взаимодействия между частями системы;
- согласованность процессов, протекающих в системе (кооперативные или когерентные отношения);
- нелинейность процессов.

Большинство процессов реальных систем носит нелинейный характер — это колебательные, периодические и близкие к ним нестационарные процессы. Они описываются нелинейными уравнениями. Примерами перехода незамкнутых систем из одного устойчивого состояния в другое устойчивое состояние могут служить автоколебания, возникающие в лазере, и солитоны — уединенные волны, возникающие в различных средах. При этом согласованность процессов, протекающих в той или иной системе, характеризуется степенью упорядоченности в системе и определяется правильностью выбора и установки управляющих параметров.

В лазерах управление осуществляется путем изменения уровня накачки, т. е. вклада энергии, за счет которой создается инверсия населенностей. В классических генераторах накачке соответствует параметр положительной обратной связи. При конвекции управляющим параметром является градиент температуры и т. д..

Самопроизвольно возникающие автоколебания являются ярким примером самоорганизации. Обыкновенные часы работают, если напряжение пружины выше критического, и останавливаются, если оно ниже. При работе часов сохраняется режим периодических колебаний маятника. Существует множество различных видов автоколебательных процессов. Другой вид самоорганизации — самопроизвольное возникновение хаоса, а из хаоса — регулярной структуры. Примером тому может служить возникновение хаотического движения атомов в жидкой и газообразной фазе при переходе полупроводниковых материалов от твердой фазы и образование упорядоченной полупроводниковой твердотельной структуры при жидкофазной и газофазной эпитаксии.

В полупроводниках могут возникать различные упорядоченные структуры, описываемые соответствующими типами элементарных ячеек: простые кубические, кубические гранецентрированные, кубические объемцентрированные, гексагональные, тетрагональные др. Большинство полупроводников и полупроводниковых соединений групп A^4 , A^4B^4 , A^3B^5 (такие как Ge, Si, GaAs, GaP и др.) кристаллизуются в структуре "алмаза" (две кубические ячейки, вставленные одна в другую и сдвинутые по диагонали куба на $1/4$). Процесс образования тех или иных структур не всегда является однознач-

ным и может идти через точки бифуркации. Так возможно образование различных модификаций карбида кремния (SiC).

При анализе колебательных процессов изначально рассматривается распределенная среда, аппроксимируемая решеткой сцепленных элементов, составляющих ее. При исследовании таких цепочек естественным образом возникают следующие вопросы. Какова динамика некоторого элемента, выделенного из цепи, и динамика всей решетки в целом? Будет ли оставаться хаос в колебательных движениях элементов или порядок отдельных элементов распространится на всю цепь? В случае, если поведение отдельных элементов решетки является хаотическим, будет ли решетка тоже проявлять хаотические свойства? Возможно ли проявление определенной структуры на макроуровне системы? Как влияют на структуру другие элементы, вводимые в систему? Ответ на эти и другие вопросы следует искать путем теоретических и экспериментальных исследований.

В случае открытой системы, когда происходит обмен энергией с окружающей средой, решетка подвержена внешнему воздействию, т. е. каждый ее элемент испытывает определенное влияние. Под действием поступающей энергии (тепловой, оптической) одни группы атомов решетки согласованно колеблются относительно положения равновесия, другие колеблются в противофазе. Таким образом, возникают различные типы колебаний решетки: продольные и поперечные, акустические и оптические. Последние проявляются на макроуровне в спектрах оптического отражения, если атомы, образующие решетку, имеют различную степень ионности. При определенных значениях заданных параметров пространственная картина будет сохраняться. Однако с ростом концентрации легирующей примеси происходит качественная перестройка: пространственный порядок начинает искажаться, в системе появляются случайным образом разбросанные элементы. В структуре появляются дефекты типа атома в междоузлии, вакансии. Кроме того, в зависимости от типа легирующей примеси изменяются концентрации электронов или дырок. Последнее приводит к появлению плазменных колебаний (колебаний свободных носителей заряда). Совместное действие элементов и свободных носителей заряда наблюдается в спектрах оптического отражения [59–62] и носит название плазмон-фононного взаимодействия.

Основной задачей синергетики является нахождение и исследование таких математических моделей, которые исходят из наиболее типичных предположений о свойствах отдельных элементов, составляющих систему, и законах взаимодействия между ними. Руководствуясь этим, рассмотрим твердые растворы полупроводников, легирован-

ных различными примесями, и исследуем проявление взаимодействия элементов систем и их самоорганизацию на макроуровне.

На рис. 1 приведены спектры оптического отражения эпитаксиальных структур $n\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}\text{:Sn}/p\text{-InAs}$. Кривые сдвинуты по вертикальной оси для наглядности (начало отсчета отмечено справа) и расположены в порядке увеличения концентрации легирующей примеси — олова (Sn) в эпитаксиальном слое. Толщина эпитаксиальных слоев образцов примерно одинакова и равна ~ 3 мкм.

В спектрах оптического отражения образцов легированных Sn. (рис. 1, кривые, 1–4), наблюдаются полосы в области 185 , 220 и 310 см^{-1} , обусловленные решеточными колебаниями ячеек InSb, InAs, InP (соответственно) в твердом растворе $n\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}$. В образце 4 полоса 185 см^{-1} слабо заметна на фоне сильного плазменного отражения.

В спектре отражения 1 (см. рис. 1) образца с наименьшей концентрацией легирующей примеси минимум плазменного отражения (плазменный минимум) наблюдается в области 60 см^{-1} . По мере увеличения концентрации легирующей примеси

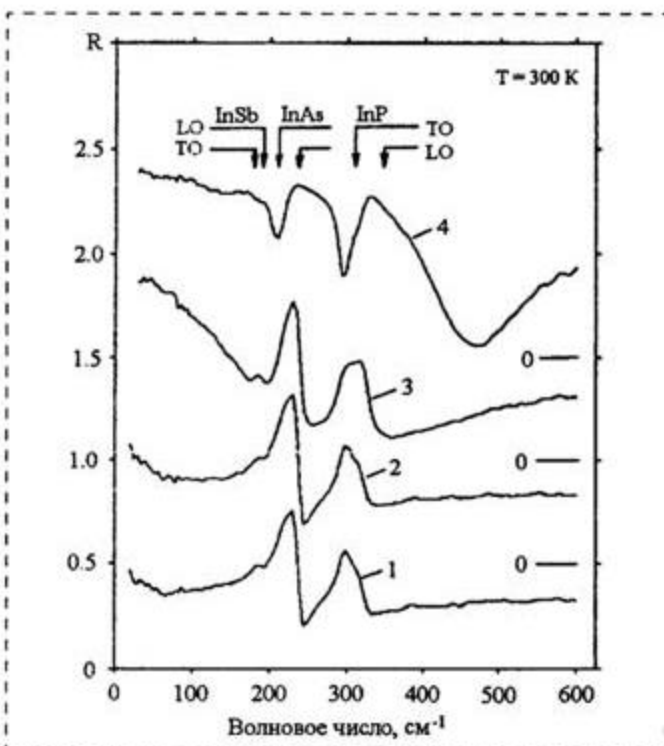


Рис. 1. Спектры отражения эпитаксиальных структур $n\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}\text{:Sn}/p\text{-InAs}$ (слои легированы Sn). $T = 300\text{ K}$. Кривые 2–4 сдвинуты по вертикали, начало отсчета справа. Образцы:

1 — $\omega_p = 50\text{ см}^{-1}$; 2 — $\omega_p = 80\text{ см}^{-1}$; 3 — $\omega_p = 210\text{ см}^{-1}$; 4 — $\omega_p = 370\text{ см}^{-1}$ (единица измерения плазменной частоты ω_p переведена в см^{-1} путем умножения на скорость света c)

плазменный минимум смещается вправо по шкале волновых чисел. Заметим, что в спектрах имеются и другие минимумы, обусловленные трехмодовым поведением фононного спектра колебаний. При малых концентрациях электронов (n), когда плазменная частота $\omega_p \ll \omega_{\text{LOInSb}}$ (ω_{LOInSb} — частота продольного оптического фонона InSb) нижний по частоте минимум (см. кривую 1 на рис. 1), обусловлен плазменной модой и меняется с изменением n вверх по частоте до фононной моды InSb (см. кривая 3). Минимум практически исчезает при более высоких n (кривая 4). С увеличением n происходит смещение и других минимумов. При высоких n , когда $\omega_p \gg \omega_{\text{LOInP}}$, плазменным становится верхний по частоте минимум. Так же как и у бинарных соединений [62], при $\omega_p \sim \omega_{\text{LOInSb}}$, $\omega_p \sim \omega_{\text{LOInAs}}$ и $\omega_p \sim \omega_{\text{LOInP}}$, в твердом растворе $n\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}$, возникает сильное плазмон-фононное взаимодействие. На рис. 2 представлены кривые, показывающие изменение положения всех четырех минимумов в зависимости от плазменной частоты ω_p . Расчеты проводились с использованием многоосцилляторной модели коэффициента преломления (диэлектрической проницаемости) [61]:

$$n(\omega) = \sqrt{\epsilon(\omega)} = \left\{ \epsilon_{\infty} - \frac{\epsilon_{\infty} \omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau)} + \sum_j \frac{s_j \omega_{Tj}^2}{\omega_{Tj}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

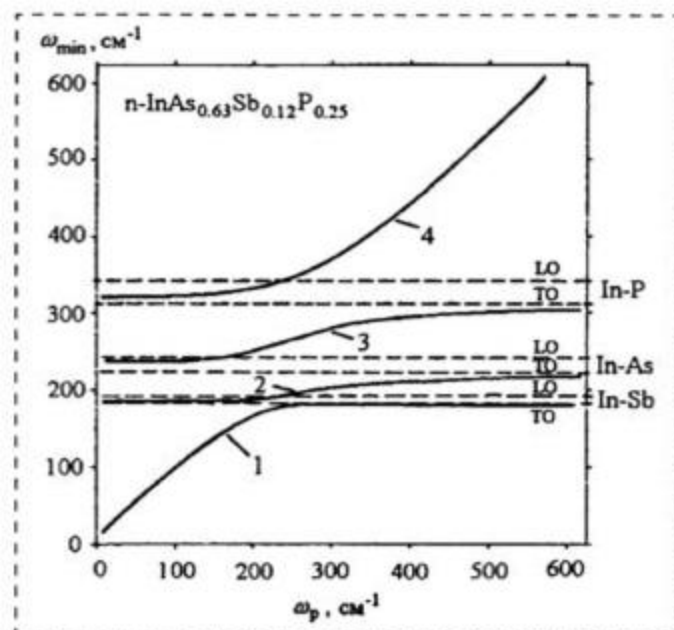


Рис. 2. Положение минимумов в спектре отражения $n\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}$ в зависимости от плазменной частоты ω_p . $T = 300$ К. Нумерация кривых соответствует порядку следования характерных минимумов в спектрах отражения, считая вверх по частоте

Таблица 1
Значения параметров слоев $n\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}$, определенные в результате процедуры подгонки теоретических спектров под экспериментальные данные

Обра- зец	ω_p , см ⁻¹	$\tau \cdot c$, см	γ_1 , см ⁻¹	γ_2 , см ⁻¹	γ_3 , см ⁻¹	h , мкм
1	50	0,03	10	15	15	2,2
2	80	0,03	10	15	15	1,8
3	210	0,03	9	15	15	2,4
4	370	0,03	15	15	15	2,8

где ϵ_{∞} — высокочастотная диэлектрическая проницаемость; ω_p — плазменная частота; ω_{Tj} — частота j -го поперечного оптического фонона; ω — текущая частота; s_j — сила j -го осциллятора; τ — время релаксации; γ_j — параметр затухания. Высокочастотная диэлектрическая проницаемость ϵ_{∞} определялась линейной интерполяцией соответствующих значений компонентов. Силы осцилляторов рассчитывались по формуле

$$s_j = (\epsilon_{sj} - \epsilon_{\infty j})x_j,$$

где $\epsilon_{\infty j}$, ϵ_{sj} — высокочастотная и низкочастотная диэлектрические проницаемости; x_j — мольная доля компонента. Коэффициент отражения определялся в предположении бесконечной толщины слоя (с целью исключения влияния интерференционных явлений) по формуле:

$$R = \left| \frac{1-n}{1+n} \right|^2 = \frac{(1-n')^2 + (n'')^2}{(1+n')^2 + (n'')^2}. \quad (2)$$

В расчетах использованы параметры, приведенные в табл. 1, полученные при описании экспериментальных спектров рис. 1 с применением методики, описанной в работе [61]. Учитывалось уменьшение величины τ с увеличением ω_p . Промежуточные значения τ получались линейной интерполяцией и экстраполяцией имевшихся данных (единица измерения τ из секунд переведена в сантиметры путем умножения на скорость света c). Из рис. 2 видно, что смещение второго и третьего, считая вверх минимумов (кривые 2 и 3), с изменением ω_p происходит в ограниченной области. Нижний минимум остается ниже ω_{TOInSb} — частоты поперечного оптического фонона InSb, а верхний — выше ω_{TOInP} — частоты поперечного оптического фонона InP при любых ω_p . Наиболее сильное плазмон-фононное взаимодействие происходит в области 200–300 см⁻¹, когда во взаимодействии участвуют все три фонона.

В отличие от спектров отражения эпитаксиальных структур $n\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}\text{:Sn/p-InAs}$, спектры отражения $p\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}\text{:Zn/n-InAs}$ (легированные Zn) имеют более сложный вид. На рис. 3

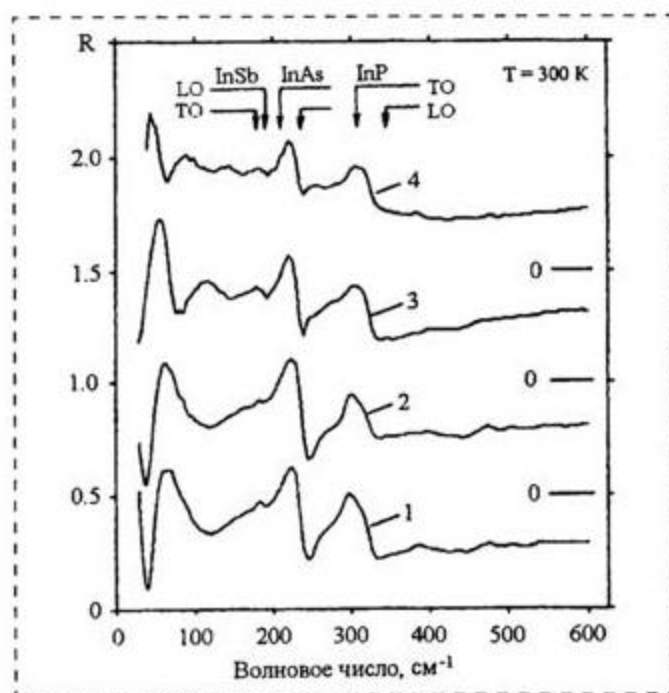


Рис. 3. Спектры отражения эпитаксиальных структур $p\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}/n\text{-InAs}$ (слои легированы Zn); $T = 300$ К. Кривые 2–4 сдвинуты по вертикали, начало отсчета отмечено справа. Образцы:

1 — $\omega_p = 80$ см^{-1} ; 2 — $\omega_p = 150$ см^{-1} ; 3 — $\omega_p = 230$ см^{-1} ; 4 — $\omega_p = 290$ см^{-1}

представлены спектры оптического отражения образцов $p\text{-InAs}_{0.63}\text{As}_{0.12}\text{P}_{0.25}/\text{Zn}/n\text{-InAs}$, имеющих различную концентрацию легирующей примеси Zn. Кривые 2–4 сдвинуты по вертикальной оси, начало отсчета каждого спектра отмечено справа. Спектры расположены в порядке увеличения концентрации легирующей примеси. Параметры эпитаксиальных слоев различных образцов представлены в табл. 2, они получены также с помощью методики, описанной в работе [61], с использованием двухслойной модели (цинк проникает глубоко в подложку на глубину до 20 мкм, образуя слой с иным коэффициентом преломления). В спектрах отражения образцов $p\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}/\text{Zn}/n\text{-InAs}$ также наблюдаются три решеточных полосы в области 185, 220 и 310 см^{-1} , обусловленные колеба-

ниями ячеек InSb, InAs, InP. Кроме этих полос в длинноволновой части, ниже 200 см^{-1} , на всех спектрах видны пики осцилляций.

Заметим, что период осцилляций различен для каждого образца, причем период осцилляций уменьшается от образца 1 (кривая 1) к образцу 4 (кривая 4), т. е. существует связь периода осцилляций с концентрацией легирующей примеси: период осцилляций уменьшается с увеличением концентрации легирующей примеси. Возникновение таких осцилляций связано с интерференционными явлениями, возникающими в слое, образованном вследствие диффузии цинка в подложку [61]. Период этих осцилляций в 3–6 раз превышает период осцилляции, который дает слой толщиной ~3 мкм. При увеличении концентрации легирующей примеси Zn расширяется в глубь подложки граница области диффузионного слоя, на которой происходит заметное изменение показателя преломления (другой границей является граница слой — подложка, ее положение не меняется). С увеличением толщины слоя период осцилляций должен уменьшаться, так это и происходит (рис. 3). В образцах 1–4 толщина диффузионного слоя меняется от 8 до 19 мкм (получено из расчетной модели).

Сравнение спектров отражения рис. 3 (кривые 1–4) показывает, что с увеличением концентрации легирующей примеси изменяется не только период осцилляций в длинноволновой части спектра, но и заметно уменьшается амплитуда осцилляций. Также наблюдается подъем длинноволновой части спектра, свидетельствующий об увеличении концентрации свободных носителей заряда и увеличении плазменного отражения (плазменной частоты). Однако этот подъем менее резок, чем в спектрах отражения эпитаксиальных структур n -типа, и наблюдается в более широкой области спектра. Это объясняется тем, что эффективная масса дырок твердого раствора в p -типе на порядок меньше чем в n -типе.

На рис. 4 представлены кривые, показывающие изменение положения четырех минимумов в спектре отражения $p\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}$, характерные для данного твердого раствора в зависимости от плазменной частоты ω_p . В расчетах использованы параметры, приведенные в табл. 2. Так же как и при получении кривых, рис. 2, расчеты проводились с использованием модели коэффициента преломления (1), коэффициент отражения определялся в предположении бесконечной толщины слоя по формуле (2) и учитывалось уменьшение значения τ с увеличением ω_p (путем линейной интерполяции и экстраполяции имевшихся данных).

При исследованиях спектров отражения эпитаксиальных структур $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y/\text{InAs}$ была обнаружена тонкая структура. Особенно четко она проявляется в спектрах отражения, измеренных

Таблица 2
Значения параметров слоев $p\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}$, определенные в результате процедуры подгонки теоретических спектров под экспериментальные данные

Образец	ω_p , см^{-1}	τ , с	γ_1 , см^{-1}	γ_2 , см^{-1}	γ_3 , см^{-1}	h , мкм
1	80	0,002	10	15	15	2,1
2	150	0,0015	12	25	25	2
3	230	0,0012	15	15	15	2,8
4	290	0,0015	15	15	15	2,4

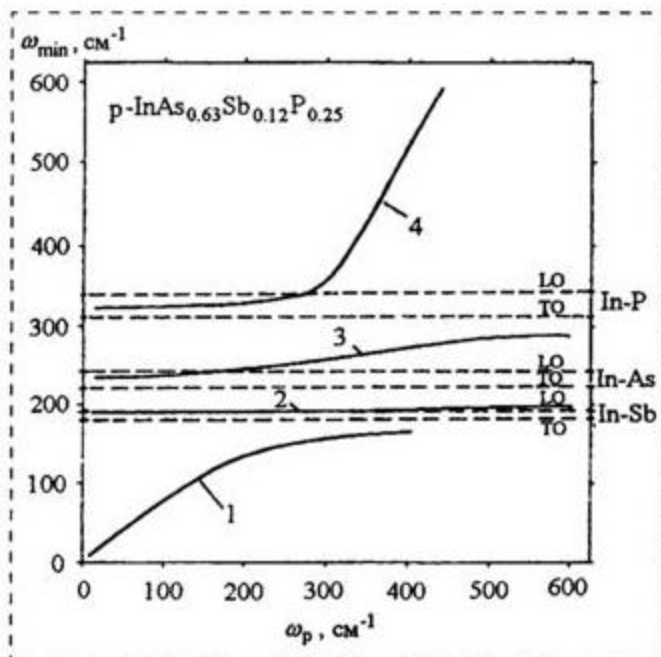


Рис. 4. Положение минимумов в спектре отражения $p\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}$ в зависимости от плазменной частоты ω_p ; $T = 300$ К. Нумерация кривых соответствует порядку следования характерных минимумов в спектрах отражения, считая вверх по частоте

при температуре 80 К. На рис. 5 представлены спектры отражения эпитаксиальных структур $\text{InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}/\text{InAs}$: образец 1 — нелегированный; образец 2 — легированный Sn. Видно, что однофононная полоса, соответствующая колебательной моде In-P в твердом растворе расщеплена и имеет два максимума отражения $305,0$ и $320,8$ см^{-1} , интенсивности полос близки по значению. Количественная информация о частотах соответствующих осцилляторов может быть определена по характерным точкам перегиба полос в спектрах отражения. Взяв за основу точки перегиба полос в спектрах отражения, с помощью многоосцилляторной модели коэффициента преломления (1) были определены частоты осцилляторов, соответствующие полосам $305,0$ и $320,8$ см^{-1} . Полосе 305 см^{-1} соответствуют частоты осцилляторов TO — 300 см^{-1} , LO — $328,1$ см^{-1} , а полосе $320,8$ см^{-1} — частоты осцилляторов TO — $311,0$ см^{-1} , LO — $340,2$ см^{-1} . Есть предположение, что тонкая структура связана с неупорядоченностью структуры твердых растворов, дефектами типа междоузельных атомов и вакансий.

Как показывают исследования, такого рода взаимодействие элементов решетки твердотельной структуры и свободных носителей заряда может быть эффективно описано относительно несложными моделями. Возможно управление свойствами макроуровня (спектральной характеристикой отражения) системы путем изменения количества

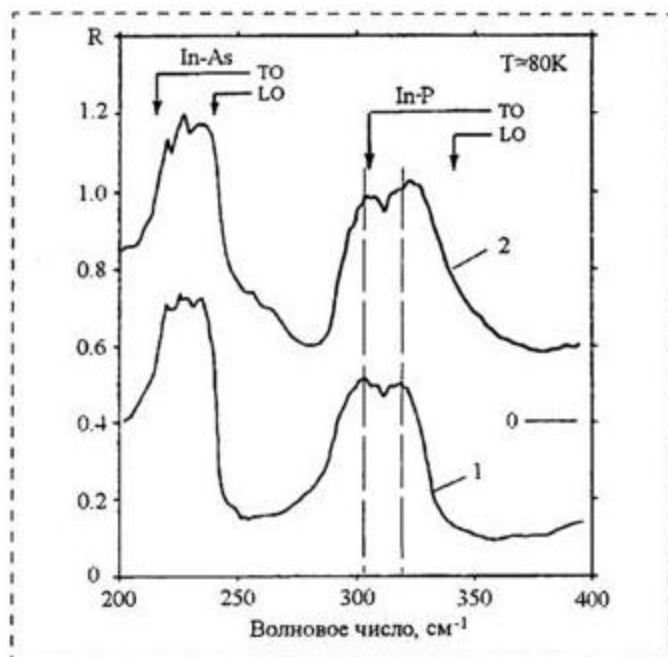


Рис. 5. Тонкая структура решеточных колебаний в спектрах оптического отражения эпитаксиальных структур $\text{InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}/\text{InAs}$. Кривая 2 сдвинута по вертикали, начало отсчета отмечено справа.

Образец 1 — нелегированный; 2 — легированный Sn

ных и качественных характеристик на микроуровне системы. При этом возможно прогнозирование характеристик и получение твердотельных структур с заданными свойствами, проявляющимися на макроуровне системы. Внешние возмущения небольшой амплитуды и соответствующей частоты позволяют наблюдать самоорганизованную структуру.

Представленные в статье экспериментальные данные получены в совместной работе с А. А. Копыловым.

Список литературы

1. Информационно-структурные принципы совершенствования средств измерений / Крысин Ю. М., Михеев М. Ю., Семочкина И. Ю., Чувкин Б. В. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та. 1999. 134 с.
2. Васильев В. А. Информативное преобразование регистрирующих твердотельных структур // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. № 9. С. 40–43.
3. Васильев В. А. Информационный ресурс регистрирующих твердотельных структур // Измерительная техника. 2002. № 7. С. 22–24.
4. Васильев В. А. Уменьшение влияния дестабилизирующих факторов на информативный сигнал датчиков // Датчики и системы. 2002. № 4. С. 12–15.
5. Михеев М. Ю., Семочкина И. Ю., Чувкин Б. В. Измерительные преобразователи на базе замкнутых структур интегрирующего типа // Под ред. В. В. Усманова. Пенза: Изд-во Пенз. технолог. ин-та. 2000. 140 с.
6. Щербаков М. А. Цифровая полиномиальная фильтрация: теория и приложение. Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та. 1997. 246 с.
7. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.

8. Данилов Ю. А., Кадомцев Б. Б. Нелинейные волны: самоорганизация. М.: Наука, 1987. 240 с.
9. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985. 419 с.
10. Рабинович М. И. Стохастические автоколебания и турбулентность // УФК. 1978. Т. 125. № 1. С. 123—168.
11. Mandelbrot B. B. Fractals. San Francisco: W. H. Freeman and Co., 1977. 365 p.
12. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: Мир, 1991. 240 с.
13. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах М.: Мир, 1979. 512 с.
14. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры устойчивости и флуктуации. М.: Мир, 1973. 280 с.
15. Пригожин И. От существующего к возникающему. М.: Мир, 1985. 327 с.
16. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986. 431 с.
17. Николис Г., Пригожин И. Понимание сложного. М.: Мир, 1990. 342 с.
18. Пригожин И., Стенгерс И. Время, хаос, квант. М.: Прогресс, 1994. 240 с.
19. Лоскутов А. Ю., Михайлов А. С. Введение в синергетику: учебное руководство. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. 272 с.
20. Капица С. П., Малинецкий Г. Г., Курдюмов С. П. Синергетика и прогнозы будущего. М.: Наука, 1997. 286 с.
21. Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Синергетика как новое мировидение: диалог с И. Пригожиным // Вопросы философии. 1992. № 12. С. 3—20.
22. Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. М.: Наука, 1994. 236 с.
23. Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Антропный принцип в синергетике // Вопросы философии. 1997. № 3. С. 62—79.
24. Евин И. А. Синергетика мозга и синергетика искусства. М.: ГЕОС, 2001. 163 с.
25. Басин М. А., Шилович И. И. Синергетика и INTERNET. СПб.: Наука, 1999. 71 с.
26. Сулис В. Коллективный интеллект // Синергетика и психология. М.: ЯНУС-К, 1999. С. 38—64.
27. Бранский В. П. Теоретические основания социальной синергетики // Петербургская социология, 1997. № 1. С. 148—179.
28. Финюгеев А. Г. Синергетический подход к управлению процессами в информационных структурах // Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе: Тр. XXVIII Международной конф. Ялта; Гурзуф. Изд-во Запорожского гос. ун-та. 2001. С. 37—39.
29. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco: Freeman, 1982. 427 p.
30. Мандельброт Б. Самоафинные фрактальные множества, "Фракталы в физике" М.: Мир, 1988. 672 с.
31. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 262 с.
32. Пайттен Х.-О., Риктер П. Х. Красота фракталов. М.: Мир, 1993. (1986 — оригинал) — 176 с.
33. Том Р. Динамическая теория морфогенеза // На пути к теоретической биологии. М.: Мир, 1970. С. 145—155.
34. Арнольд В. И. Теория катастроф М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1983. 80 с.
35. Томсон Дж. М. Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. М.: Мир, 1985. 254 с.
36. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. Т. 1. М.: Мир, 1984. 350 с.
37. Чернавский Д. С. Синергетика и информация: Динамическая теория информации. М.: Наука, 2001. 244 с.
38. Самарский А. А., Галактионов В. А., Курдюмов С. П., Михайлов А. П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. М.: Наука, 1987. 480 с.
39. Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Основания синергетики. Режимы с обострением, самоорганизация, темпомыры. СПб.: Алтейя, 2002. 414 с.
40. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. М.: Наука, 1997. 320 с.
41. Галактионов В. А., Курдюмов С. И., Михайлов А. П., Самарский А. А. Асимптотическая стадия режимов с обострением и эффективная локализация тепла в задачах нелинейной теплопроводности // Дифференциальные уравнения. 1980. Т. 16. № 7. С. 1196—1204.
42. Курдюмов С. П., Куркина Е. С., Тельковская О. В. Режимы с обострением в двухкомпонентных средах // Математическое моделирование. 1989. № 1. С. 34—50.
43. Галактионов В. А., Курдюмов С. П., Самарский А. А. Процессы в открытых диссипативных системах. М.: Знание. Сер. "Математика—кибернетика", 1988. № 11. 32 с.
44. Руденко А. П. Саморазвивающиеся каталитические системы // ДАН СССР. 1964. Т. 159. С. 1374—1377.
45. Руденко А. П. Теория саморазвития открытых каталитических систем. М.: Изд-во МГУ, 1969. 276 с.
46. Руденко А. П., Кулакова И. И. Условия образования кимберлитовых алмазов и проблема алмазоносности с точки зрения теории открытых каталитических систем // Геохимия. 1989. № 7. С. 961—972.
47. Руденко А. П. Термодинамические закономерности химической эволюции и основы биоэнергетики // Методологические и теоретические проблемы биофизики. М.: Наука, 1979. С. 120—127.
48. Руденко А. П. Самоорганизация и прогрессивная эволюция в природных процессах в аспекте концепции эволюционного катализа // Рос. хим. журн. 1995. Т. 39. № 2. С. 55—71.
49. Климонтович Ю. Л. Статистическая теория открытых систем. М.: Янус, 1995. 624 с.
50. Климонтович Ю. Л. Турбулентное движение и структура хаоса. М.: Наука, 1990. 317 с.
51. Васильев В. А., Романовской Ю. М., Яхт В. Г. Автоволновые процессы в распределенных кинетических системах // УФН. 1979. Т. 128. № 4. С. 625—666.
52. Измайлов И. В., Калайда В. Т., Магазинников А. Л., Пойзнер Б. Н. Бифуркации в точечной модели кольцевого интерферометра с запаздыванием и поворотом поля // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1999. Т. 7. № 5. С. 47—59.
53. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979. 279 с.
54. Климонтович Ю. Л. Статистическая теория открытых систем. Т. 2. М.: Янус-К, 1999. 440 с.
55. Ахромеева Т. С., Бункин Ф. В., Кириченко Н. А., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г., Самарский А. А. Периодические колебания и диффузионный хаос при нагреве металлов излучением // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1987. Т. 51. № 6. С. 1154—1161.
56. Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика — теория самоорганизаций: Идеи, методы, перспективы. М.: Знание, 1983. 63 с.
57. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение. М., Мир, 1988. 240 с.
58. Климонтович Ю. Л. Статистическая теория открытых систем. Т. 3: Физика квантовых открытых систем М.: Янус, 2001. 508 с.
59. Зингер Г. М., Ипатова И. П., Рыскин А. И. Оптические свойства четверных твердых растворов на основе соединений A^2B^5 в области решеточных и плазменных колебаний // ФТП. 1984. Т. 18. № 1. С. 24—42.
60. Баранов А. Н., Васильев В. А., Копылов А. А., Шерстнев В. В. Физическая модель и определение характеристик гетероструктур $InAs_xSb_{1-x-y}/InAs$ оптическими методами // Оптоэлектроника-89: Труды координационного совещания социалистических стран по физическим проблемам оптоэлектроники. Баку, 16—20 октября 1989. С. 121.
61. Баранов А. Н., Васильев В. А., Копылов А. А., Шерстнев В. В. Оптическое отражение и определение характеристик эпитаксиальных структур $InAs_{1-x-y}Sb_xP_y/InAs$ // ФТП. 1991. Т. 25. Вып. 1. С. 99—101.
62. Смит Р. А. Полупроводники. М.: Мир, 1982. 558 с.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 535.373:577.3

С. Н. Летута, канд. физ.-мат. наук,
Ю. Д. Лангх, канд. физ.-мат. наук,
С. Н. Пашкевич, канд. физ.-мат. наук,
Э. К. Алиджанов, канд. физ.-мат. наук,
Оренбургский государственный университет
E-mail: letuta@com.osu.ru

ФОТОСЕНСИБИЛИЗИРОВАННЫЕ РЕАКЦИИ В ОКРАШЕННЫХ РАСТВОРАХ НУКЛЕИНОВЫХ КИСЛОТ

Рассмотрены процессы селективной модификации макромолекул нуклеиновых кислот лазерным излучением видимого диапазона. Фотосенсибилизаторами реакций в растворах служили органические наноструктуры, синтезированные на биополимерах.

Введение

Комплексное исследование молекулярных механизмов лазерной модификации биологически важных макромолекул — нуклеиновых кислот (НК) и белков — важнейшая задача современной биофизики. Возможна "прямая" фототрансформация полимеров за счет использования квантов высоких энергий, в результате поглощения которых в хромофорных группах макромолекул реализуются $S_0^M \rightarrow S_1^M$ переходы ($h\nu_{\text{возб}} \geq h\nu_{00}$, где ν_{00} — 0, 0-частота перехода $S_0^M \rightarrow S_1^M$, индекс "м" указывает на принадлежность электронных состояний макромолекулам). При этом теряется селективность воздействия всеми мономерными звеньями полимерной цепи. В работах [1, 2] был предложен метод фотомодификации макромолекул, обеспечивающий высокую селективность как по типу полимеров, так и по месту в их первичной структуре. Метод основан на ступенчатом двухквантовом возбуж-

дении длинноволновым лазерным излучением (видимая или ближняя УФ область спектра) комбинированно адресованных или избирательно связанных с данными макромолекулами лигандов по схеме $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_n$. Сами макромолекулы не поглощают возбуждающего излучения, но квазирезонансно поглощают на удвоенной (за вычетом стокового сдвига на уровне S_1) частоте. Переданной от молекул посредников энергии достаточно для модификации полимерных цепей, вплоть до их дробления на короткие фрагменты.

В настоящей работе также исследованы процессы модификации макромолекул НК. В качестве посредников между внешним лазерным излучением и субстратом использовались органические субмикронные молекулярные структуры с заданными характеристиками, синтезированные на "поверхности" биополимеров. Органические наноструктуры представляли собой ассоциаты молекул красителей от димеров до крупных агрегатов, образующихся и сохраняющих устойчивость

за счет слабых межмолекулярных взаимодействий. Для получения функциональных элементов с заданными свойствами необходимо было оптимизировать режимы синтеза наноструктур, а для их идентификации — разработать методы контроля топографии, структуры и состава.

Данные исследования представляют интерес, так как практически любая модификация компонентов НК может приводить к изменениям в метаболизме клетки и ее генетических свойств. Следует иметь в виду реальную возможность синтеза органических наноструктур для модификации биополимеров *in vivo*. Число связанных объектов субмикронных размеров зависит от структуры макромолекул (вторичной или третичной) и поэтому может давать информацию о ней.

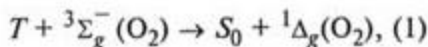
Синтез органических наноструктур в растворах биополимеров

В основу процесса синтеза органических наноструктур положена самоорганизация молекул органических красителей при кооперативном связывании с макромолекулами [3]. Для оптимизации режимов синтеза необходимо определить критические концентрации агрегации молекул красителей в присутствии НК, исследовать зависимость степени связывания от ионной силы растворов и его состояния (температуры, pH и др.), изучить ингибирование связывания ионов различных металлов и зависимость константы диссоциации от типа иона.

Для исследования связывания органических красителей с ДНК мы использовали методы спектрофотометрии, флуориметрии, упругого рассеяния света и сканирующей зондовой микроско-

пии (СЗМ). Большая часть экспериментов проведена с использованием красителей — родамина 6Ж (Р6Ж), акридинового оранжевого (АО), акридинового желтого (АЖ), метиленового голубого (МГ) и кристаллического фиолетового (КФ). Использовалась ДНК, выделенная из молок лосося или селезенки быка ("Sigma").

Основанием для выбора перечисленных красителей послужили их специфические спектрально-люминесцентные свойства — большой квантовый выход флуоресценции [4], способность к самоагрегации и изменению соотношения между выходом флуоресценции и интеркомбинационной конверсии при образовании ассоциатов [5]. Интенсивная флуоресценция существенно облегчает контроль за содержанием красителя в веществе, что открывает возможность для использования люминофоров в диагностических целях. Фотодинамическая активность хромофоров в основном определяется эффективностью генерации химически активного синглетного $^1\Delta_g(O_2)$ кислорода [6–7]. Сенсибилизированное заселение $^1\Delta_g(O_2)$ осуществляется в ходе реакции тушения триплетных состояний хромофоров



где S_0 и T — основное и триплет-возбужденное состояние молекулы красителя; ${}^3\Sigma_g^-(O_2)$ и ${}^1\Delta_g(O_2)$ — основное и возбужденное состояние молекулярного кислорода. Поэтому велика роль интеркомбинационных переходов, в результате которых образуются триплетные состояния молекул красителей. При соответствующем подборе концентрации веществ можно получить оптимальное сочетание перечисленных свойств красителей.

Анализ спектров поглощения водных растворов Р6Ж показывает, что при добавлении ДНК в раствор происходит трансформация кривых поглощения красите-

ля. Смещение максимума поглощения в коротковолновую область свидетельствует об эффективном образовании ассоциатов Р6Ж [4–5, 8].

В ассоциатах многоатомных молекул может содержаться от нескольких десятков до нескольких тысяч молекул красителя (в "полимерах Шайбе", в которых плоскости отдельных молекул располагаются параллельно друг другу, содержится до 10^6 молекул [4–5]). Принимая во внимание размеры молекул и характерные расстояния

между ними при стопочной укладке в ассоциатах [9], следовало ожидать, что такие крупные объекты, соизмеримые или многократно превосходящие диаметр (~2 нм) линейных макромолекул ДНК, будут обнаружены при визуализации двойной спирали методами СЗМ [10]. На рис. 1. представлены изображения неокрашенной (а) и окрашенной (б) родамином 6Ж ($5 \cdot 10^{-4}$ моль/л) ДНК, иммобилизованной на поверхности слюды, полученные с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). Сканирование проводилось в воздушной среде в контактном режиме с использованием заостренных пирамидальных зондов фирмы Park Scientific Instruments. Методика приготовления образцов для сканирования аналогична [10]. Латеральные размеры объектов на рис. 1 следует определять с поправкой на эффект уширения, обусловленный конечностью радиуса кривизны зонда (от 10 до 15 нм).

На АСМ-изображениях (сканах) окрашенных макромолекул (рис. 1, б) отчетливо видны наноструктуры преимущественно овальной формы. Средняя длина продольной оси наименьших ("первичных") структур (на рисунке обозначены цифрой 1) около 150 нм, длина поперечной оси — 50 нм, высота — 5 нм, включая

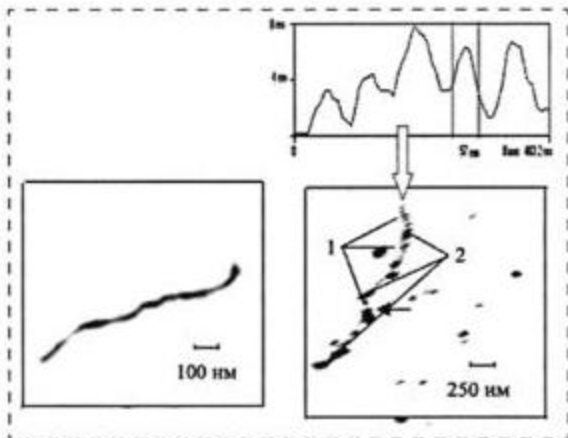


Рис. 1. Изображения ДНК, иммобилизованной на поверхности слюды, полученные с помощью атомно-силового микроскопа:

а — неокрашенная макромолекула; б — макромолекула, окрашенная родамином 6Ж (концентрация красителя в растворе $5 \cdot 10^{-4}$ моль/л)

диаметр двойной спирали ДНК. Продольная ось таких агрегатов составляет с осью спирали угол, близкий к 90° (наиболее отчетливо это видно в верхнем участке окрашенной спирали на рис. 1, б). Размеры крупных структур достигают 220 нм в длину и 90 нм в ширину, а их средняя высота — 20 нм (на рисунке обозначены цифрой 2). Такие агрегаты преимущественно вытянуты вдоль спирали. По-видимому, они образованы слиянием малых первичных наноструктур в более крупные и поэтому выглядят ориентированными вдоль полимерной цепи.

На рис. 1, б вверху показан профиль пяти первичных наноструктур верхнего участка окрашенной спирали. По вертикали отложена высота объектов, по горизонтали — ширина их поперечной оси. В качестве примера, между двумя вертикальными линиями указана ширина (57 нм) поперечной оси одного из агрегатов (четвертого сверху). Анализ размеров и формы наблюдаемых объектов приводит к выводу о том, что при образовании ассоциатов на поверхности полимерной цепи, наряду с стэкинг-регулярностью, имеет место регулярность соединения молекул красителя "встык". Следовательно, можно получить стэкинг-структуры со стопочной укладкой не

только одиночных хромофоров, но и слоев молекул.

В условиях наших экспериментов в одну стопку укладывались 1–3 слоя (расстояние между молекулами, образующими ассоциаты ~0,8–1 нм) [8–9], измеренная высота агрегатов ~1–3 нм, число цепей в слое достигало 50, каждая цепь содержала около 150 звеньев. Оценка сделана с учетом принципа наибольшей плотности упаковки и размеров молекул красителей [9].

Таким образом, за счет самоорганизации молекул красителя на внешней стороне двойной спирали ДНК образуются органические наноструктуры. Устойчивость таких субмикронных систем сохраняется за счет слабых межмолекулярных взаимодействий. Если концентрация красителя в растворе меньше $5 \cdot 10^{-5}$ моль/л, то АСМ-изображения окрашенной и неокрашенной ДНК становятся неразличимы. Из данных АСМ и оптических измерений следует, что при низких концентрациях краситель Р6Ж присутствует в растворе преимущественно в виде свободных и (или) связанных макромолекулами мономеров. Приближение к концентрации, при которой начинается самоагрегация молекул Р6Ж в растворе (в присутствии ДНК) сопровождается эффективным образованием наноструктур на внешней стороне двойной спирали. Сравнивая размеры полученных агрегатов с размерами молекулы красителя и расстоянием между молекулярными слоями, можно оценить число молекул в них. В условиях экспериментов, результаты которых представлены на рис. 1, в первичных наноструктурах содержится примерно $1,5 \cdot 10^4$ молекул.

С ростом концентрации красителя (до $C_{кр} > 10^{-3}$ моль/л) происходит слияние близко расположенных друг к другу наноструктур в более крупные агрегаты. Предположительно, эти агрегаты представляют собой микрокристаллы красителя. С течением времени микрокристаллы сливаются в

поликристаллы, вырастающие вдоль спирали макромолекулы. Таким образом, для синтеза наноструктур наиболее оптимальной является концентрация, при которой начинается самоагрегация молекул в растворах, не содержащих НК.

На вклад электростатических сил в общее взаимодействие красителя с ДНК указывает зависимость выхода ассоциатов от ионного состава растворов. При неизменном соотношении концентраций красителя и нуклеотидов ДНК степень связывания уменьшается с увеличением ионной силы. Наиболее активным из исследованных нами ионов является Mg^{2+} . Присутствие в растворе, содержащем $4 \cdot 10^{-4}$ моль/л ДНК и $5 \cdot 10^{-4}$ моль/л Р6Ж соли $MgCl_2$ с концентрацией $8 \cdot 10^{-4}$ моль/л, приводит к полному исчезновению связанных агрегатов красителя. Ионы Mg^{2+} уменьшают число мест связывания вследствие образования комплексов с фосфатными группами [11] и тем самым ингибируют кооперативное внешнее связывание. Заметим, что уменьшение связывания может происходить и за счет снижения константы диссоциации. Зависимость константы диссоциации от типа иона, используемого в эквивалентных концентрациях, продемонстрирована в [12].

Изменение размеров наноструктур, сформированных из молекул Р6Ж, в зависимости от концентрации $MgCl_2$ в растворе мы исследовали методом углового рассеяния света. Основу экспериментальной установки для измерения рассеянного света составлял He–Ne лазер ЛГ-78 ($\lambda = 632,8$ нм) мощностью 3 мВт, с вертикальной поляризацией излучения. В качестве фотоприемника использовался фотодиод ФЭУ-79. Угловое распределение

интенсивности рассеянного излучения измерялось в интервале углов рассеяния от 20 до 140° с шагом 10°.

Для упрощения вычисления размеров наноструктур мы полагали, что частицы имеют сферическую форму. Интенсивность рассеянного света от сферы для вертикально поляризованного падающего излучения, согласно [13], определяется выражением

$$I_{\text{теор}} = \frac{I_0}{kR^2} |S_1|^2, \quad (2)$$

где R — расстояние от точки наблюдения до частицы; I_0 — интенсивность падающего излучения; S_1 — амплитудная функция, вычисляемая по формуле

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)(a_n \pi_n + b_n \tau_n)}{n(n-1)}. \quad (3)$$

Значение амплитудной функции полностью определяется коэффициентами a_n и b_n . Эти коэффициенты зависят от величин m и x , где $x = kr$ — размер частиц в относительных единицах, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число в свободном пространстве, r — радиус сферической частицы, $m = v + i\chi$ — комплексный показатель преломления сферической частицы по отношению к окружающей внешней среде.

Экспериментально полученные индикатрисы рассеяния показаны на рис. 2. В приближении сферических частиц их началь-

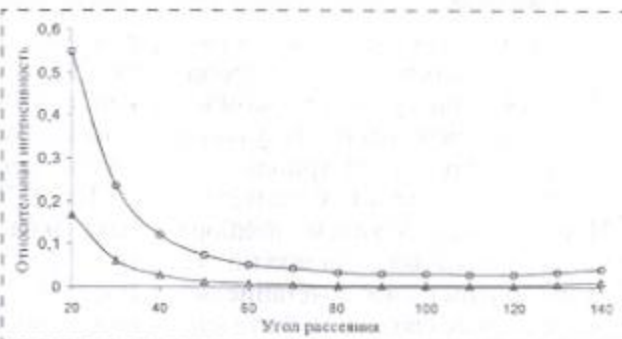


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния вертикально поляризованного излучения гелий-неонового лазера окрашенными водными растворами ДНК:

1 — концентрация $MgCl_2$ в растворе равна $8 \cdot 10^{-4}$ моль/л; 2 — в отсутствие $MgCl_2$

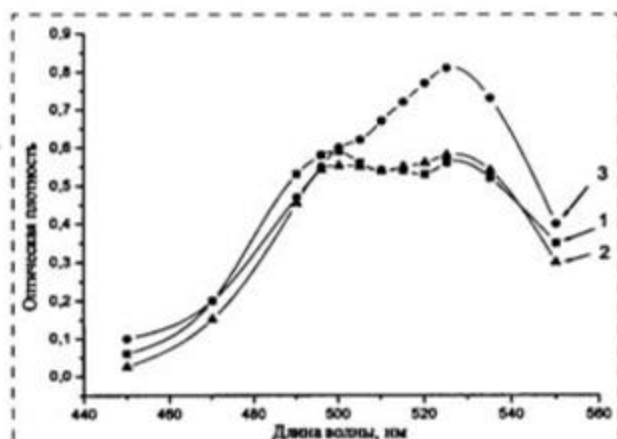


Рис. 3. Спектры поглощения агрегатов родамина 6Ж в растворах ДНК при различных температурах: 1 — 25 °C; 2 — 40 °C; 3 — 90 °C

ный диаметр при концентрации красителя $5 \cdot 10^{-4}$ моль/л составляет около 50 нм. После добавления в раствор соли $MgCl_2$ концентрации $8 \cdot 10^{-4}$ моль/л светорассеяние от агрегатов красителей не наблюдается.

Устойчивость образующихся органических структур зависит от температуры раствора. На рис. 3 приведены спектры поглощения раствора ДНК, окрашенного Р6Ж, при различных температурах. Видно, что с ростом температуры происходит смещение максимума поглощения в длинноволновую область, соответствующую поглощению мономеров красителя.

В большинстве случаев ассоциатообразование вызывает уменьшение выхода свечения люминофора при сохранении формы его спектра флуоресценции [8], т. е. при объединении молекул в ассоциаты утрачивается их люминесцентная способность. Однако существуют органические соединения, в которых возможно образование люминесцирующих ассоциатов. При этом форма спектра люминесценции существенно изменяется, и максимум свечения смещается в сторону длинных волн [4, 8]. К числу таких красителей относятся трифенилметановые красители.

Отличительная особенность трифенилметановых красителей, обусловленная специфичностью структуры, состоит в том, что в

жидких маловязких растворах эти соединения практически не флуоресцируют [14]. Квантовый выход флуоресценции возрастает при увеличении вязкости раствора. В твердых растворах, например в полимерных пленках, эти вещества становятся флуоресцирующими, с квантовым выходом флуоресценции $\Phi_{фл} \sim 0,2-0,4$ [4]. Мы воспользовались данной особенностью краси-

телей этого класса для изучения связывания КФ с НК в водных растворах.

В водных растворах КФ имеет тенденцию к самоагрегации, поэтому спектр поглощения красителя существенно зависит от его концентрации. В зависимости от концентрации красителя в спектрах поглощения КФ в воде прослеживаются полосы, ответственные за поглощение мономеров ($\lambda_{max} = 593$ нм), димеров ($\lambda_{max} = 550$ нм) и более крупных ассоциатов молекул красителя ($\lambda_{max} = 520$ нм). В вязких или твердых растворах появляются соответствующие полосы и в спектрах флуоресценции красителя. Максимумы флуоресценции с λ_{max} , равными 645, 665 и 686 нм, обусловлены свечением мономеров, димеров и крупных ассоциатов КФ соответственно. В водных растворах нам не удалось надежно зарегистрировать свечение КФ на фоне рассеянного света.

Добавление ДНК в водные растворы КФ сопровождается трансформацией спектров поглощения и возникновением флуоресценции красителя. При неизменной (10^{-4} моль/л) концентрации ДНК в растворе с увеличением содержания КФ происходит смещение максимума поглощения в сторону коротких длин волн и зеркально-симметричное длинноволновое смещение максимума флуоресценции. На рис. 4 показаны

спектры флуоресценции КФ в воде в присутствии ДНК. Возникновение флуоресценции и длинноволновое смещение максимума в зависимости от концентрации красителя в растворе позволяет предположить следующий механизм связывания КФ с ДНК. Первым этапом является связывание мономеров КФ с внешней частью макромолекулы ДНК, в результате чего резко возрастает квантовый выход флуоресценции и возникает люминесценция мономеров с $\lambda_{max} = 645$ нм. Согласно [15], при наличии в структуре красителя громоздких заместителей интеркалирование в двойную спираль маловероятно. Структура молекулы КФ именно такова, поэтому вероятность интеркалирования невелика. Положительная кооперативность процесса взаимодействия КФ с ДНК с ростом концентрации красителя последовательно обеспечивает формирование димеров, а затем и более крупных агрегатов. В результате кооперативного связывания молекул КФ с внешней частью полимерной цепи образуются наноструктуры, аналогичные структурам из родаминов.

Характер взаимодействия акридиновых (АО, АЖ) и тиазиновых (МГ) красителей с ДНК отличается от связывания родаминовых

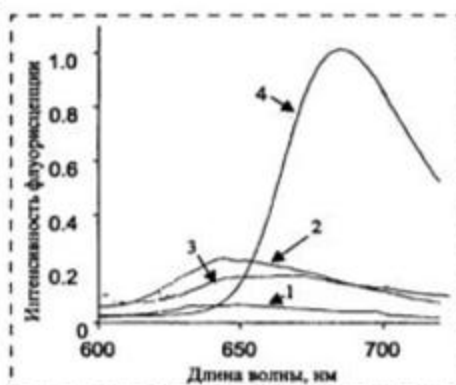


Рис. 4. Спектры флуоресценции КФ в водных растворах:

- 1 — КФ ($5 \cdot 10^{-4}$ моль/л);
- 2 — КФ ($5 \cdot 10^{-5}$ моль/л) + ДНК ($4 \cdot 10^{-4}$ моль/л);
- 3 — КФ ($5 \cdot 10^{-4}$ моль/л) + ДНК ($4 \cdot 10^{-4}$ моль/л);
- 4 — КФ ($5 \cdot 10^{-3}$ моль/л) + ДНК ($4 \cdot 10^{-4}$ моль/л)

и трифенилметановых красителей. При малых концентрациях красителя в растворе (малых по отношению к нуклеотидам ДНК) в спектрах поглощения наблюдается незначительный сдвиг в длинноволновую область спектра. Одновременно изменяются физические свойства ДНК — растет вязкость растворов и повышается температура плавления комплекса краситель—нуклеиновая кислота по сравнению со свободной нативной ДНК. Дальнейшее увеличение концентрации красителей (при отношении числа молекул красителя к числу нуклеотидов, превышающем $\sim 1/4$) сопровождается сдвигом максимума поглощения в коротковолновую область спектра. По мере увеличения количества вещества последовательно наблюдаются два максимума поглощения. Один указывает на образование димеров красителей, второй — на возникновение более крупных агрегатов.

Подобные спектральные смещения обусловлены двумя энергетически различными типами связывания. Первый соответствует сильному связыванию мономеров — интеркалированию. Этот тип связывания насыщен при соотношении краситель/нуклеотид $\sim 1/5$ для АО и АЖ и $\sim 1/7$ для МГ. После насыщения первого типа связывания появляются слабые комплексы. Молекулы красителей связываются с внешней частью полимерной цепи и вступают в "стэкинг-взаимодействие" друг с другом. В результате образуются димеры и более крупные агрегаты красителей — органические наноструктуры.

Таким образом, несмотря на то, что связанные красители не изменяют функций, они могут стать причиной нарушения их биологических функций вследствие изменения конфигурации полимерной цепи или стерического экранирования (см. рис. 1) при важных метаболических превращениях макромолекул.

Локальная гипертермия макромолекул

Нуклеиновые кислоты не поглощают в ближайшей УФ и видимой областях спектра и поэтому они устойчивы к прямому действию света. Однако в присутствии связанных красителей характер действия света на НК изменяется. Мы изучали действие лазерного излучения видимого диапазона на слабые комплексы ДНК—краситель в водных растворах.

Возбуждение молекул красителей проводилось импульсно-периодическим YAG-Nd³⁺ лазером с удвоением частоты ($\lambda = 532$ нм) и длительностью импульсов $\tau = 10$ нс. Плотность мощности излучения P в импульсе изменялась в пределах $1-70$ МВт/см². При малой интенсивности возбуждения заселяются только нижние синглетные S_1 состояния молекул красителей. Поскольку в исследованных нами многоатомных молекулах сильно перекрываются полосы $S_0 \rightarrow S_1$ и $S_1 \rightarrow S_n$ поглощения, то при воздействии на вещество интенсивным излучением возбуждаются оба перечисленных перехода. Поэтому при высокой плотности мощности возбуждения эффективно заселяются высокие синглетные S_n -состояния хромофоров по схеме $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_n$ в результате последовательного поглощения молекулой двух квантов излучения с $\lambda = 532$ нм [16–18] и достигается состояние, соответствующее $\nu \sim 37\,500$ см⁻¹.

Состояние ДНК и красителя в растворе контролировалось путем измерения оптической плотности необлученных и облученных растворов в диапазоне длин волн λ от 220 до 300 нм. Измерения проводились с помощью ФЭУ-100 через монохроматор МДР-1. Сигналы регистрировались в автоматическом режиме. Сканирование по λ осуществлялось со скоростью 100 нм/мин с шагом 2 нм.

При концентрации 10^{-5} моль/л краситель Р6Ж присутствует в растворе преимущественно в виде связанных и свободных мономеров. Возбуждение таких систем лазерным излучением с плотностью мощности $P \approx 1$ МВт/см² не дает видимых изменений оптической плотности растворов. Увеличение P до уровня $30-50$ МВт/см² сопровождается ростом оптической плотности растворов на 15–20 %. Зависимость оптической плотности ДНК от времени после облучения раствора в течение 1 мин при $P = 30$ МВт/см² и частоте повторения импульсов 10 Гц приведена на рис. 5, а.

Гиперхромный эффект можно объяснить локальной тепловой денатурацией ДНК в места связывания мономеров Р6Ж. Локальный нагрев осуществляется за счет безызлучательной релаксации высоких синглетных состояний (ВСС) молекул связанных красителей. Действительно, при плотностях мощности возбуждающего излучения ~ 10 МВт/см² и вы-

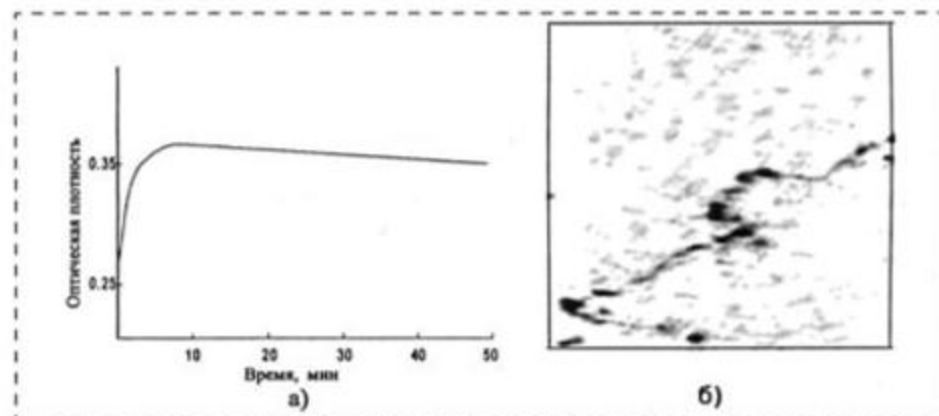


Рис. 5. Зависимость оптической плотности раствора ДНК от времени после облучения в присутствии родамина 6Ж (10^{-5} моль/л) (а); АСМ-изображение ДНК из того же раствора (б)

ше с высокой эффективностью заселяются ВСС родамина 6Ж [19–21] за счет ступенчатого (через первое возбужденное синглетное состояние) поглощения двух квантов излучения. Квантовый выход люминесценции из ВСС оценивается значением, определенным в [22], а интерконверсия в триплетное состояние составляет 10^{-5} [17]. Таким образом, релаксация ВСС Р6Ж происходит преимущественно безызлучательным путем. Если принять плотность раствора равной $(1,3–1,5) \cdot 10^3$ кг/см³, удельную теплоемкость раствора $(2–4) \cdot 10^3$ Дж/(кг·К) [23], то в результате безызлучательной релаксации электронно-возбужденного состояния хромофора, после поглощения кванта света с $\lambda = 532$ нм, в радиусе $r \approx 1$ нм температура повышается примерно на 40–50 К. При начальной температуре раствора 25 °С такого температурного "скачка" вполне достаточно для локальной тепловой денатурации двойной спирали [24].

Данное предположение было подтверждено прямым наблюдением конформационных изменений нитей ДНК методом АСМ. На рис. 5, б приведено АСМ-изображение ДНК, взятой из раствора, облученного в течение 1 мин при $P = 30$ МВт/см² и частоте повторения импульсов 10 Гц в присутствии Р6Ж с концентрацией 10^{-5} моль/л. Отчетливо видно, что целостность нити сохраняется, но вдоль полимерной цепи проявляются участки с увеличенными геометрическими размерами (на скане они видны как объекты повышенной яркости). Мы полагаем, что эти участки образуются в результате переплетения одиночных цепей ДНК, образованных вследствие локальной тепловой денатурации двойной спирали [24].

Одновременно происходит разрезание макромолекул ДНК на фрагменты. Этот вывод сделан на основании данных, полученных

методами АСМ. На отдельных сканах обнаруживаются короткие фрагменты макромолекул ДНК. По-видимому, такие повреждения двойной спирали, как и в случаях, рассмотренных в [25–28], вызваны безызлучательным переносом энергии фотовозбуждения с высоких синглетных уровней красителей на макромолекулы. Доля коротких фрагментов составляет лишь несколько процентов от общего числа поврежденных макромолекул. Следовательно, доминирующим процессом фотомодификации в данном случае является частичная тепловая денатурация ДНК. При этом целостность макромолекул сохраняется, происходит лишь локальная деструкция двойной спирали.

Лазерное разрезание молекул

Существенно иной характер повреждений полимерных цепей наблюдается при облучении ($P = 30$ МВт/см², время облучения 1 мин, частота следования импульсов 10 Гц) растворов с концентрацией красителя $C = 5 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Формирование наноструктур из молекул красителей влечет за собой изменение скоростей внутримолекулярной релаксации. Важным является увеличение (примерно в 20 раз по сравнению с мономерами [5, 8]) квантового выхода в триплетное состояние. Облучение таких растворов сопровождается эффективной генерацией синглетного кислорода 1O_2 ($^1\Delta_g$, $^1\Sigma_g^+$) (схема

(1)) и перекисного радикала $HO_2^\cdot$ [4]. Химическая активность синглетного кислорода хорошо известна [6, 7], и он способен оказывать деструктивное действие на НК. Возможная роль перекисного радикала в индукции разрывов цепей НК обсуждалась в [29]: после поглощения света $HO_2^\cdot$ легко распадается с образованием гидроксил-радикала, который эффективно расщепляет фосфо-

диэфирную связь в ДНК. Доминирующим процессом модификации при большой концентрации красителя в растворе становится двунитевое разрезание макромолекул.

Разрезание двойной спирали на фрагменты сопровождается эффектом светоиндуцированной диффузии (СИД) НК [25–28]. Эффект состоит в том, что плотность макромолекул в облученном объеме уменьшается, а в прилегающих к нему областях, наоборот, увеличивается. Это объясняется более быстрой диффузией образовавшихся коротких фрагментов макромолекул их облученной зоны, чем проникновение в нее целых молекул НК из соседних областей. Авторы [25–28] предложили использовать эффект СИД для детектирования двунитевых разрывов ДНК и количественной оценки эффективности лазерного разрезания макромолекул.

Для наблюдения эффекта СИД НК кювета (вакуумируемая кварцевая кювета толщиной 1 мм) с раствором сканировалась с шагом 10 мкм в направлении, перпендикулярном зондирующему лучу. Экспериментально измеренное относительное изменение оптической плотности раствора $\Delta D/D_0$, как функция поперечной пространственной координаты (как и в [25–28]), при фокусировке лазерного излучения цилиндрической линзой (размеры освещаемой области $0,08 \times 10$ мм) дает для пространственного интеграла $\int \Delta D(x) dx$ значение, близкое к нулю. Измерения проводились через 10 мин после окончания облучения. Полученные результаты свидетельствуют о разрезании ДНК. В контрольных экспериментах при возбуждении неокрашенных НК никаких изменений оптической плотности растворов зарегистрировано не было.

Вакуумирование раствора (до 0,133 Па) приводит к резкому падению эффекта СИД НК. Это указывает на участие в фотореакциях, сенсibiliзируемых красите-

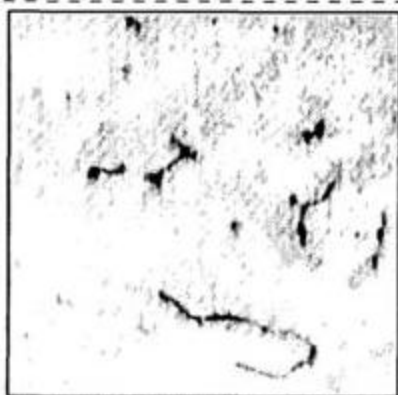


Рис. 6. АСМ-изображение фрагментов ДНК, полученных в результате облучения раствора ДНК, окрашенного роданином 6Ж ($5 \cdot 10^{-4}$ моль/л)

лями, молекулярного кислорода. На основании данных экспериментальных фактов можно предположить, что главной причиной фотоповреждений ДНК является деструктивное действие химически активных форм кислорода.

Наблюдение фрагментов полимерных цепей методами АСМ подтверждают выводы о разрезании макромолекул на фрагменты, сделанные на основе оптических измерений. На рис. 6 представлено АСМ-изображение фрагментов ДНК, полученных в результате облучения раствора ДНК, окрашенного Р6Ж, с концентрацией $C = 5 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Хорошо видно, что разрезание происходит только в местах образования наноструктур красителя и, наоборот, цепи, свободные от агрегатов красителей (на рисунке нижняя спираль), остаются неповрежденными.

Заключение

В водных растворах, содержащих катионные красители, интенсивное лазерное излучение видимого диапазона вызывает различные повреждения макромолекул ДНК. Молекулярные механизмы фотодеструкции полимерных цепей определяются состоянием сенсibilизатора в комплексе краситель—макромолекула. Основным результатом фотореакций, sensi-

билизируемых красителями, способными генерировать химически активные формы кислорода, является разрезание полимерных цепей на фрагменты.

При облучении окрашенных растворов НК следует учитывать локальное тепловыделение, обусловленное безызлучательной релаксацией возбужденных состояний хромофоров. Выделившегося количества тепла может оказаться достаточным для локальной тепловой денатурации ДНК.

Резкой границы между нетепловыми и тепловыми интенсивностями излучения не существует, и поэтому при облучении одновременно могут иметь место как фотосенсибилизированные реакции, так и тепловые эффекты.

Список литературы

1. Stockmann M. I. Nonlinear laser photomodification of macromolecules: possibility and applications // *Phys. Lett.* 1980. V. 76. A. N 3, P. 191–193.
2. Штокман М. И. Кинетика двухквантового возбуждения примесных центров в конденсированной среде // *ЖЭТФ*. 1984. Т. 87. № 1. С. 84–99.
3. Летуа С. Н., Кеппе Г. А., Левшин Л. В., Никитин А. Н., Давыдова О. К. Исследование взаимодействия роданина 6Ж с ДНК методами спектрофотометрии и зондовой микроскопии // *Оптика и спектроскопия*. 2002. Т. 93. № 6. С. 916–919.
4. Теренин А. Н. Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений // М.: Наука, 1967.
5. Южаков В. И. Агрегация молекул красителей и ее влияние на спектрально-люминесцентные свойства растворов // *Успехи химии*. 1992. Т. 61. № 6. С. 1114–1141.
6. Красновский А. А. мл. Итоги науки и техники. Сер. Современные проблемы лазерной физики. М.: ВИНТИ. Т. 3. 1990.
7. Захаров С. Д., Иванов А. В. Светокислородный эффект в клетках и перспективы его применения в терапии опухолей // *Квантовая электроника*. 1999. Т. 29. № 3. С. 192–214.
8. Левшин Л. В., Салецкий А. М. Люминесценция и ее измерения. М.: Изд-во МГУ, 1989.
9. Жевандров Н. Д. Оптическая анизотропия и миграция энергии в молекулярных кристаллах. М.: Наука, 1987.
10. Галлямов М. О., Яминский И. В. Сканирующая зондовая микроскопия биополимеров. Т. 1. 1997. С. 25–29.
11. Благый Ю. П. Взаимодействие ДНК с биологически активными веществами (ионами металлов, красителями, лекарствами) // *Соросовский образовательный журнал*. 1998. № 10. С. 18–24.
12. Лохмани Э.-Р., Михелер А. Связывание органических красителей с нуклеиновыми кислотами и фотодинамический эффект // *Физико-химические свойства НК*. М.: Мир, 1976. С. 233–273.
13. Strawbridge K. B., Hallett F. R. Size Distributions Obtained from the Inversion of $I(Q)$ Using Integrated Light Scattering Spectroscopy // *Macromolecules*. 1994. V. 27. P. 2283–2290.
14. Красовицкий Б. М., Болотин Б. М. Органические люминофоры. Л.: Химия, 1976.
15. Морощкина Е. Б., Кривцова М. А., Глибин Е. Н. Влияние природы заместителей амидов атиоциана на способ их связывания с ДНК // *Биофизика*. 2002. Т. 47. Вып. 3. С. 444–448.
16. Летуа С. Н., Кеппе Г. А., Лантук Ю. Д., Пашкевич С. Н. Фотохромные превращения в окрашенных полимерах при двухквантовом возбуждении // *Квантовая электроника*. 2001. Т. 31. № 10. С. 925–928.
17. Рыльков В. В., Чешев Е. А. Интерконверсия из высоковозбужденных состояний ксантеновых красителей. Исследование элементарного механизма // *Опт. и спектр.* 1987. Т. 63. Вып. 5. С. 1030–1035.
18. Летуа С. Н. Триплет-синглетная интеркомбинационная конверсия в многоатомных молекулах // *Вестник ОГУ*. 2002. № 5. С. 88–91.
19. Галанин М. Д., Чижилова З. А. Люминесценция со второго возбужденного уровня роданина 6Ж // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 1971. № 4. С. 35–39.
20. Летохов В. С. Нелинейные селективные фотопроекции в атомах и молекулах. М.: Наука, 1983.
21. Ермолаев В. Л., Любимцев В. А. Физические процессы с участием высоких возбужденных синглетных состояний в органических молекулах // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1988. Т. 52. № 4. С. 770–776.
22. Ермолаев В. Л., Любимцев В. А. Спектры и квантовые выходы флуоресценции из высоких возбужденных синглетных состояний ароматических молекул в растворах // *Опт. и спектр.* 1986. Т. 61. Вып. 3. С. 511–517.
23. Досон Р., Эллиот Д., Эллиот У., Джонс К. Справочник биохимика. М.: Мир, 1991.
24. Рубин А. Б. Биофизика. М.: Высшая школа, 1987.
25. Пархоменко А. И., Раутман С. Г., Штокман М. И. Нелинейная лазерная фотомодификация макромолекул: расщепление ДНК // *ДАН СССР*. 1980. Т. 250. С. 225–227.
26. Козионов А. Л., Новожилов С. Ю., Соболев В. Е. и др. Светиндуцированная диффузия ДНК в растворах при лазерном разрезании // *Письма в ЖЭТФ*. 1980. Т. 31. Вып. 10. С. 606–610.
27. Бенименская Л. З., Козионов А. Л., Муратов Л. С. и др. Нелинейная лазерная фотомодификация нуклеиновых кислот, индуцированная интеркалирующими красителями // *Биофизика*. 1987. Т. 32. Вып. 4. С. 716–731.
28. Бенименская Л. З., Булычев Н. В., Козионов А. Л. и др. Нелинейное лазерное разрезание РНК, селективное по набору оснований // *Письма в ЖЭТФ*. 1983. Т. 38. Вып. 9. С. 424–427.
29. Rahn R. O., Sellin H. G. Photochemistry and photobiology of Nucleic Acids // *Academic Press*. New York. 1976. V. 2. P. 97–129.

Р. Зайчук, проф. медицины,
Г. Р. Салливан,
Отдел медицинской науки
и снабжения Армии США

ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ СОЛДАТА, МИКРОИНСТРУМЕНТ И ТЕЛЕМЕДИЦИНА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Высокая летальность при ранениях солдат в современных боевых операциях требует разработки жизне-спасающих передовых технологий, пригодных для использования и на поле боя, и в армейских медицинских центрах. В статье приведены результаты исследований Медицинского отдела Армии Департамента обороны США по разработке таких технологий.

Несмотря на то, что боевая травма исторически всегда была менее актуальной по сравнению с потерями от болезней и неблагоприятных условий внешней среды, в последние десятилетия общество стало уделять больше внимания тем, кто погиб или был ранен, сражаясь за свою страну. Этот вопрос всегда был источником беспокойства для солдат, но особенно для командиров, ответственных за их благосостояние и безопасность. В настоящее время размеры боевых потерь рассматриваются не только как показатели политической толерантности к военным акциям, но и как мера оценки их успеха или поражения.

В военных сводках величина боевых санитарных потерь измеряется общим процентом убитых, раненых, пропавших без вести или взятых в плен в течение одного дня сражения. Этот показатель зависит от многих факторов, среди которых наиболее важными являются: исход боя, тактическая обстановка, характер оружия, а также размер воинских единиц. При прочих равных условиях, чем они больше, тем ниже показатели потерь, поскольку крупные воинские части и формирования имеют значительно больше солдат в службах обеспечения, подвергающихся меньшей опасности поражения огнем противника.

В нынешнем столетии боевые потери свыше 10 % в день для дивизии численностью в 10–20 тыс. бойцов были необычными [1], хотя отдельные сообщения такого рода имели место. Так, например, в 1916 г. в первый день битвы при Сомме ряд наступающих Британских дивизий в течение нескольких часов теряли более 50 % личного состава [2]. В битве при Ла Дранг во Вьетнаме потери в войсках США составляли 35 %.

Медицинские последствия боевой травмы обычно оцениваются по величине смертности (процент пораженных, получивших смертельное ранение) и заболеваемости (общее число потерянных человеко-дней или среднее число дней, в течение которых раненый не способен находиться в строю по медицинским показаниям).

Современные американские исследователи опережают боевую смертность по двум статистическим показателям: процент убитых в бою (смерть наступила до оказания медицинской помощи) и процент умерших от ран (смерть наступила на этапах медицинской эвакуации). Критерии отнесения погибших к той или иной категории различаются в разных странах и в разных войнах. Вместе с тем, показатели, выведенные из данных о семи войнах, имевших место на протяжении 150 последних лет, свидетельствуют о том, что 20 % раненых неизменно относились к категории убитых в бою [4].

Таким образом, существенный прогресс достигнут лишь в уменьшении смертности раненых, получивших лечение, что обусловило снижение удельного веса умерших от ран с 16 % в Крымскую войну до 3–4 % в последних войнах [5–8]. Данный прогресс обусловлен совершенствованием системы быстрой и безопасной эвакуации раненых с поля боя, а также достижениями современной хирургии.

Приведу несколько уникальных, неопубликованных данных, касающихся статистики боевых потерь во Вьетнаме, представленных Бригадой по изучению боевых травм и эффективности оружия Армии и Военно-морских сил США. Анализ этих данных позволяет лучше понять, что должно быть сделано для снижения показателей боевой смертности. Так, например, было показано, что процент солдат, убитых в бою в результате поражения снарядом, является относительно стабильным. Он составлял 75 % случаев ранений, а в остальных 25 % случаев поражающим фактором были пули из ручного огнестрельного оружия.

Средняя вероятность повреждения снарядом мозга, сердца, крупных кровеносных сосудов и других жизненно важных органов, ведущего к немедленной смерти, составляла в этих наблюдениях 1:5, причем ранения сердца и мозга отличались особо высокой летальностью. Наиболее высокая вероятность получения смертельной огнестрельной раны для американских солдат во Вьетнаме была при ранении в грудь — четыре из пяти, в голову — девять из десяти.

Около 50 % солдат, убитых в бою во Вьетнаме, погибло от кровопотери на поле боя. Как установлено, оказание простой первой медицинской помощи могло бы спасти жизнь 20 % этих бойцов [9]. Еще 10 % раненых погибло от клапанного пневмоторакса, диагностированного лишь после смерти с

помощью рентгенологического исследования. Следовательно, своевременное вмешательство и в этих случаях могло бы способствовать сохранению жизни раненых.

Большинство боевых смертельных исходов во Вьетнаме наступало очень быстро и поэтому их число оставалось высоким несмотря на то, что среднее время обнаружения раненого и оказания ему первой помощи санитаром составляло всего 4 мин после ранения [10].

В особых тактических условиях, которые характеризовали Вьетнамскую войну (контратаки с применением высокопоражающего оружия), примерно 67 % убитых в бою умерло в течение 10 мин после ранения. Среди остальных 33 % большинство умерло между десятью минутами и одним часом после ранения. Некоторые из этих раненых не получили своевременной медицинской помощи либо потому, что санитары не смогли их обнаружить, либо потому, что боевая обстановка не позволяла им достичь раненого.

Бесспорно, что чем раньше тяжело раненный солдат получит медицинскую помощь, тем больше у него шансов остаться живым. Но эти шансы зависят также и от других факторов:

- уровня подготовки и практического опыта лиц, оказывающих первую помощь;
- наличия диагностических и лечебных устройств, облегчающих оказание медицинской помощи.

Новейшие биомедицинские инициативы

Исследовательский центр и школа Медицинского отдела Армии Департамента обороны на основе концептуального анализа структуры боевых поражений в прошлых войнах и прогноза санитарных потерь в будущих военных конфликтах определили ранги приоритетов военно-полевой медицины. Подобные исследования проводит также упомянутое выше Агентство по передовым научным проектам. Эти исследования являются принципиальными для определения актуальности внедрения передовых медицинских технологий в современную военно-медицинскую практику.

Наряду с совершенствованием практической подготовки медиков и спасателей (солдаты, обученные оказанию первой помощи и помогающие медикам на поле боя) сама система оказания медицинской помощи при боевых поражениях также может быть улучшена, что приведет к снижению смертности и заболеваемости солдат, уменьшению огромных расходов на реабилитационные мероприятия.

Агентство отвечает за выполнение многолетних программ исследования в области передовых медицинских технологий, пригодных для примене-

ния не только в армейских медицинских центрах, но также каждым солдатом регулярной армии и боевых групп специального назначения.

Комплексный перспективный план технологического развития включает пять основных направлений:

- новые методы диагностики;
- новые методы лечения ран;
- инфраструктура медицинской информации;
- телемедицина;
- медицинские симуляции (визуальные компьютерные модели).

Каждое из названных направлений имеет прямое отношение к повышению качества и доступности медицинской помощи на поле боя. Будучи адаптированной к реальным боевым условиям, теоретическая и практическая подготовка врачей для работы в условиях современной войны будет усилена мерами по сохранению жизни солдат, базирующимися на новых технологических возможностях. Последние могут быть также использованы в гражданской системе здравоохранения, особенно в медицинской практике сельских районов страны.

Ключом к успешному распространению передовых медицинских технологий на отдаленные населенные пункты является применение оперативных возможностей телемедицины. Она использует новейшие информационные системы для немедленного обнаружения раненого или больного, ориентирует на оказание помощи в первую очередь тем пострадавшим, которые в ней более всего нуждаются, профилирует подготовку врачей к боевым условиям и позволяет направлять все имеющиеся средства для обеспечения врачей, спасающих жизнь тяжело раненым на поле боя или пострадавшим в очаге катастрофы.

Личный монитор солдата

Личный монитор солдата является частью его боевой экипировки и представляет собой миниатюрное устройство, состоящее из новейших датчиков внешней среды, не раздражающих физиологических сенсоров с процессором, геопозиционного приемника и беспроводного радио с маломощным источником питания (рис. 1, 2, см. четвертую сторону обложки). Этот монитор может регистрировать и передавать на расстояние жизненные показатели солдата непрерывно или оставаться интактным до тех пор, пока:

а) монитор будет востребован оператором для сигнализации о месте расположения и жизненных показателях раненого солдата;

б) жизненные показатели раненого настолько отклонятся от принятой нормы, что его личный монитор будет автоматически подавать повторные

сигналы о его расположении и состоянии, пока он не будет выключен санитаром-инструктором.

Личный монитор солдата может взаимодействовать со специально ориентированным на него спутником, а также может быть включен в новейшую систему кодированной беспроводной телефонной связи. Персональный монитор потенциально может снизить боевую смертность, поскольку он позволяет:

- повысить осведомленность оператора о точном местонахождении раненого и благодаря этому избежать его вторичного поражения собственным огнем;
- обеспечить каждого солдата возможностью индикации химических и биологических боевых поражающих агентов;
- предоставить возможность военному медику приступить к медицинской сортировке сразу же после ранения. И поскольку ему будет известно точное местонахождение раненого, тяжесть ранения и шока, это позволит оптимизировать использование имеющихся средств лечения и эвакуации;
- своевременно констатировать смерть раненого на поле боя и тем самым исключить неоправданное направление бригады эвакуаторов в район боевых действий.

Новые методы лечения ран

Новые методы лечения ран направлены на сохранение функции органов и предотвращение кровопотери. В настоящее время проводятся исследования в области фармакологических технологий и предпринимаются попытки достичь состояния временной остановки жизненных процессов, аналогичной зимней спячке или анабиозу животных.

Целью этого подхода является поддержание функции жизненно важных органов на минимальном физиологическом уровне до тех пор, пока не появится возможность остановить кровотечение, вывести раненого из состояния шока и предотвратить развитие гипоксии благодаря применению автоматических устройств, обеспечивающих быструю механическую (жгут) или фармакологическую коррекцию.

Как только будет достигнута лекарственная или хирургическая стабилизация состояния раненого, он будет эвакуирован из района боевых действий в специально оборудованном индивидуальном боксе. Последний обеспечит безопасную дальнюю транспортировку раненого под контролем физиологических показателей и в условиях изоляции его от воздействия неблагоприятных факторов внешней среды. Такой бокс способен также функцио-

нировать как отделение госпиталя интенсивной терапии на одного пациента.

Индивидуальный бокс можете выполнять следующие функции:

- быть связанным с личным монитором солдата для обеспечения непрерывного мониторинга его жизненных показателей;
- поддерживать стабильность физиологических показателей организма путем введения жидкостей, лекарств или применения других медицинских вмешательств;
- механически поддерживать жизненные функции раненого;
- обеспечивать индивидуальную защиту раненого от неблагоприятных природных воздействий и вторичного поражения боевыми средствами.

Инфраструктура медицинской информации

Интегрированная в глобальную систему спутниковой телевизионной сети медицинская информационная инфраструктура призвана обеспечивать поддержку всей технологической цепи. Для ее успешной работы информация должна транслироваться непрерывно, в унифицированной форме, доступной для восприятия всеми звеньями медицинской службы, начиная от театра боевых действий и заканчивая базовыми медицинскими центрами. Эта цель будет достигнута путем использования гибкой системы электронной регистрации боевых поражений, не привязанной к определенному типу оборудования.

Информация будет заложена в разнообразных базах данных (лабораторные анализы, радиологические и патолого-анатомические изображения, истории болезни). Она станет доступной для использования в глобальной телекоммуникационной системе в реальном времени, способствуя сотрудничеству между врачами разных стран. Кроме того, указанная инфраструктура обеспечит функционирование системы принятия решений путем внедрения компьютерных программ, построенных на алгоритмах. Они будут помогать врачам, сестрам, патологоанатомам и парамедицинскому персоналу в оценке состояния больных, диагностике и лечении.

Таким образом, внедрение компьютерной телеинформационной инфраструктуры позволит расширить диагностическое и лечебное "окна" от оказания помощи на поле боя до медицинской помощи гражданскому населению в отдаленных регионах. Технологические решения, способные повысить уровень восприятия и оценки обстановки, будут базироваться на совершенных инженерных системах, обеспечивающих точно ориентированный, многоканальный, совпадающий во времени доступ к имеющимся данным. Улучшение объективной

базы для принятия решений, в свою очередь, позволит врачам общей практики и специалистам эффективнее обмениваться мнениями и опытом, используя новейшие средства связи в интересах лучшего обеспечения как первичного, так и последующих этапов медицинской помощи.

Телемедицина

Телеобучение (Телеинструктаж). Телеинструктаж обеспечивает каждого санитар-инструктора односторонней видео- и голосовой связью с врачом или его помощником для получения рекомендаций по проведению жизнеспасательных мер. Имеются предложения вмонтировать видеокамеру в защитные очки военного медика, снабдить его фиксированным к шлему микрофоном, компактными наушниками и ладонным компьютером. Вся эта экипировка будет соединена с инструктором через широкополосную кодированную систему множественной связи.

Как раненый, так и военный медик получают пользу от такого инструктажа. Вместе с тем, врач, наблюдающий за оказанием первой помощи в боевых условиях, сможет лучше подготовиться к следующим этапам лечения и эвакуации. И, наконец, анализ эффективности спасательных мер на поле боя окажется полезным для разработки более совершенных учебных программ подготовки медицинских работников.

Телеконсультации. Телеконсультации позволяют врачу, работающему в медицинских учреждениях переднего края, консультироваться со специалистами других учреждений, включая армейские медицинские центры и гражданские клиники в тылу страны.

Медицинский отдел Армии США уже сейчас использует телемедицинскую связь, с помощью которой специалисты Армейского медицинского центра имени Уолтера Рида (Центр) оказывают консультативную помощь медикам, работающим в Германии, Сомали, Македонии и Хорватии. Используя дигитальную камеру, портативный компьютер и модем, медицинский работник, находящийся в Европе, передает фотографии и описание больного к ним в Центр для анализа их специалистами. По существу, это и есть межконтинентальная медицинская телеконсультация. Этот первый простой этап с использованием камеры и текстуальных данных вскоре будет дополнен передачей синхронного во времени двустороннего живого изображения, а также более тесным сотрудничеством между врачами, работающими в медицинских центрах и провинциальных больницах.

Современные технологии позволяют надеяться, что в скором будущем телеконсультации станут ба-

зироваться на глобальной сети высокочастотной связи, способной передавать сотни миллионов битов информации в секунду (полные истории болезни 1 тыс. больных могут быть переданы через океан в считанные секунды). Указанный тип связи расширит профессиональные возможности врачей, работающих вдали от базовых медицинских центров. Так, например, при демонстрации передовых технологий во время полевых учений в июне 1993 г. современные технологические средства обеспечивали синхронную трансляцию в реальном времени, а также двустороннюю аудиосвязь, передачу текстов и других консультативных данных из места учений в Центр и Университет штата Вирджиния. Консультации включали множественные синхронные "окна" на видеомониторах, которые позволяли врачам Центра взаимодействовать и осуществлять согласованные действия с хирургом полевого хирургического госпиталя на основе просмотра таких данных:

- истории болезни раненого солдата;
- графического изображения жизненных признаков и ЭКГ пациента;
- дигитального изображения рентгеновского снимка;
- видеопередачи, проведенной в реальном времени.

Врач-консультант имел возможность не только "обследовать" больного и беседовать с хирургом, но также обращать его внимание на наиболее важные позиции в транслируемом в модеме рентгеновском снимке. При этом характер взаимодействия медиков становился настолько реальным, что врач-консультант чувствовал себя так, как будто он находился рядом с больным в той отдаленной местности. В будущем этот метод позволит расширить рамки экспертных медицинских консультаций при одновременном сокращении численности медицинского и вспомогательного персонала, работающего на поле боя.

Телехирургия и телехирургический инструктаж

Телехирургия распространяет идею телеконсультаций на физическое вмешательство специалиста, находящегося на большом расстоянии от больного. Другими словами, консультант может не только слышать и видеть то, что ему сообщается о больном, но и участвовать в операции, пользуясь лазерной указкой или манипулятором.

Армейский медицинский отдел в содружестве с Агентством по передовым научным технологиям разрабатывает вариант дистанционно управляемой телевизионной хирургической системы. Ее эффективность была успешно продемонстрирована в

опытах на животных и в полевых учениях с использованием симуляционных моделей [11, 12].

Система состоит из двух компонентов: пульта дистанционного управления и центральной хирургической рабочей установки. Пульт дистанционного управления имеет камеру, ведущую передачу в трех измерениях, дистанционные манипуляторы, обладающие большой "ловкостью" и высокой тактильной чувствительностью, а также стереофонические микрофоны. На хирургической рабочей установке смонтированы видеомонитор, стереофонический динамик и хирургические инструменты, управляемые с помощью высокоточного манипулятора, обладающего тактильной и реагирующей на усилие обратной связью. Система позволяет хирургу, находящемуся в медицинском центре, проводить операции раненому на поле боя с таким же успехом, с каким он выполнял бы подобное вмешательство в своей клинике.

Использование глобальной коммуникационной сети в телехирургии дает возможность специалистам, находящимся в разных местах, участвовать в одной и той же операции или использовать хирурга высшей квалификации в качестве первого ассистента хирурга полевого или провинциального госпиталя. Описанная система позволит осуществлять операции в опасных или недоступных для хирурга местах (подводная лодка, Антарктида, космическая станция) или в странах третьего мира, не затрачивая средств и времени на транспортировку больных.

В будущем возможно использование указанной системы и в микрохирургии. В настоящее время телехирургическая рабочая установка работает в масштабе 1 : 1. Но он может быть заменен микромасштабом, позволяющим использовать значительно увеличенные изображения, применять миниатюрные и даже микроскопические инструменты. Это позволит хирургу оперировать на самых тонких структурах, вплоть до органелл изолированных клеток (митохондрии, тельца Гольджи) [11].

Медицинские симуляции (визуальные модели)

Медицинская симуляция — это применение новейших технологий для разработки визуальных компьютерных имитаций реальных объектов, позволяющих создавать уникальную учебную обстановку, в которой военные и гражданские врачи, сестры, помощники врачей, санитары-инструкторы и санитары будут обучаться на моделях тела человека, адекватных реальным структурам.

Управление по моделированию и симуляциям Департамента обороны США поставило цель — не принимать ни одного решения без предваритель-

ной проверки результатов в имитационных моделях. Полагают, что этот подход будет также полезным в стимулировании познавательных способностей обучаемых.

Программа создания симуляций включает три цели:

- 1) создать работающую, близкую к реальной, модель структуры и функций тела человека;
- 2) обеспечить гладкий переход от обучения к клинической практике;
- 3) интегрировать медицинскую помощь раненым в оперативные требования боевой обстановки.

Сотрудничая с проектом "Визуальные компьютерные модели человека" (Проект) Национальной медицинской библиотеки и используя новейшие военно-игровые имитации, разработанные Институтом анализа средств защиты Департамента обороны, Программа медицинских симуляций предполагает создание коммерческого имитатора структуры и функций человеческого тела. Упомянутый выше Проект будет обеспечивать Программу данными дигитального магнитно-резонансного изображения и компьютерной томографии трупов мужского и женского полов, необходимыми для создания целевой модели.

В перечне частных целей находятся морфологические структуры и их взаимоотношения, позволяющие строить визуальные модели опухолей, баллистики огнестрельных ран, вариативности строения тела человека. Дальнейший технологический прогресс позволит создавать также симуляционные динамические модели физиологических функций человека. Кроме того, планируется разработка моделей боевых травм для изучения патогенеза кровопотери, механизмов шока, получения реальной картины изменений жизненных признаков, мимикрирующих более глубокие изменения при травматическом и патологическом процессах.

Симуляции распространятся и на область чувственного восприятия человека. Тактильная чувствительность, голос и побуждаемая механическим усилием обратная связь будут запрограммированы в новых моделях. Оператор, одетый в чувствительные перчатки, будет "чувствовать" движение скальпеля, разрезающего ткани. Трехмерное восприятие предметов откроет хирургу, санитару-инструктору или студенту-медику возможность осуществлять учебную "экскурсию" внутрь тела человека.

Таким образом, симуляционные модели позволят врачам поддерживать на должном уровне имеющиеся практические навыки и успешнее овладевать новыми, более совершенными методами хирургического вмешательства.

В обстановке, позволяющей делать ошибки без последствий для больного, молодые врачи и опытные хирурги будут "проигрывать" на компьютерах

варианты оперативных подходов, планировать стратегию операций на следующий день, принимая в расчет прогнозы, полученные на симуляционных моделях.

Использование визуальных симуляций тела человека в до- и последилольной подготовке врачей позволит существенно снизить потребность в трупном материале и вивисекциях. Кроме того, они могут помочь студентам-медикам изучать в интегральной связи академические дисциплины, традиционно разделенные учебными программами. Благодаря этому изучение анатомии, физиологии и биохимии будет происходить в более тесной связи с клиническими предметами. Физическое обследование больных, клиническая диагностика и фармакологические последствия медицинских вмешательств могут также быть отнесены к тем разделам медицинского образования, в которых симуляционные модели окажутся полезными для повышения эффективности учебного процесса.

Заключение

Передовые диагностические процедуры, новые методы консервативного и хирургического лечения, а также учебные симуляционные модели появились в результате инициатив Департамента обороны, направленных на развитие новых технологий. В сочетании с возможностями современной телесвязи передовые технологии способны существенно расширить "стены" базовых медицинских центров вплоть до отдаленных регионов планеты. Предоставляемые ими возможности открывают перспективы для внесения изменений в доктрину и политику здравоохранения.

Независимо от того, имеем ли мы дело с раненым на поле боя бойцом или с жертвой несчастного случая в мирное время, подход к оказанию

экстренной медицинской помощи принципиально одинаков. Он заключается в необходимости предоставления наиболее доступной и адекватной помощи в максимально короткие сроки. Именно поэтому многие из обсуждаемых нами проектов могут найти применение как в военной медицине, так и в системе гражданского здравоохранения, подтверждая идею двойного использования разработанных технологий.

Список литературы

1. Dupuy T. N., Brinkerhoff J. R., Johnson C. C., Clark P. J. Handbook on Ground Forces Attrition in Modern Warfare. Fairfax, Va, Data Memory Systems, Inc, 1986. P. 68.
2. Middlebrooke M. First Day of the Somme. New York: WW Norton Co, 1972. P. 243—251.
3. Moore G. H., Galloway L. J. We Were Soldiers Once ... And Young. New York: Random House, 1992.
4. Beebe G. W., De Baey M. E. Battle Casualties. Springfield, III, Charles C Thomas, 1952. P. 21, 77.
5. Palmer A. The Crimean War. New York: Dorset Press, 1987. P. 244.
6. Seaman L. L. The Real Triumph of Japan or the Conquest of the Silent Foe. Detroit: Association of the Military Surgeons of the United States, 1905. P. 3.
7. Bzik K. D., Bellamy R. F. A note on combat casualty statistics // Milit Med. 1984. N 149. P. 229—230.
8. Carrell P. Stalingrad: The Defeat of the German 6th Army. Atglen, Pa, Schiffer Publishing Ltd, 1993. P. 323.
9. Bellamy R. F. The causes of death in conventional land warfare: implications for combat casualty care research // Milit Med. 1984. 149. P. 55—62.
10. Wound Data and Munitions Effectiveness Team. Evaluation of Wound Data and Munitions Effectiveness in Vietnam. Final Report, Table D.14—39, pD-58. Vol. 3. Alexandria, Va: Defense Documentation Center, Defense Logistics Agency, Cameron Station, 1970.
11. Satava R. M. Surgery 2001: a technologic framework for the future // Surg Endosc. 1993. N 7. P. 111—113.
12. Satava R. M. Virtual reality surgical simulator: the first steps // Surg Endosc. 1993. N 7. P. 203—205.
13. Zajchuk R., Sullivan G. R. Battlefield Trauma Care: Focus on Advanced Technology // Military Medicine. 1995. January.

ИНФОРМАЦИЯ

**Великий Новгород
14—15 октября 2003 г.**

Московский институт радиотехники, электроники и автоматики
проводит

Научно-техническую конференцию

"ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЭМС И ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ СЛОЖНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ"

При участии:
EVGroup (Австрия)
DISCO HI-TEC EUROPE GmbH (Япония)
ОАО "Планета" (Россия)
ООО "Икар-Импульс" (Россия)

ИНФОРМАЦИЯ

SPIE's International Symposium

Micromachining and Microfabrication

25—29 January 2004

San Jose Convention Ctr.
San Jose, California USA

Conferences • Courses • Exhibition

M. Edward Motamedi, Revoltech Microsystems
Rajeshuni Ramesham, Jet Propulsion Lab.
2004 Symposium Chairs

Micromachining and Microfabrication Process Technology, p. 3

Reliability, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS, p. 3

MEMS/MOEMS Components and Their Applications, p. 4

Microfluidics, BioMEMS, and Medical Microsystems, p. 4

MOEMS and Miniaturized Systems, p. 5

Micromachining Technology for Microoptics and Nanooptics, p. 5

MOEMS Display and Imaging Systems, p. 6

Executive Organizing Committee

Isabelle Chartier, CEA-LETI (France)
David L. Dickensheets, Montana State Univ.
Ayman El-Fatraty, BAE SYSTEMS (UK)
Albert K. Henning, Redwood Microsystems, Inc.
Jerome F. Jakubczak, Sandia National Labs.
Siegfried, W. Janson, The Aerospace Corp.
Eric G. Johnson, CREOL/Univ. of Central Florida
Peter A. Krulevitch, Lawrence Livermore National Lab.
Hubert K. Lakner, Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (Germany)

Mary-Ann Perez-Maher, MEMSCAP, Inc.
M. Edward Motamedi, Revoltech Microsystems
Gregory P. Nordin, The Univ. of Alabama in Huntsville
Ian Papautsky, Univ. of Cincinnati
Rajeshuni Ramesham, Jet Propulsion Lab.
Danelle M. Tanner, Sandia National Labs.
Hakan Urey, Koc. Univ. (Turkey)
Peter Woias, Albert-Ludwigs-Univ. Freiburg/IMTEC (Germany)

Abstract Due Date: 16 June 2003 Manuscript Due Date: 3 November 2003

All due dates must be strictly observed

CONTENTS

**Alferov Zh. I., Aseev A. L., Gaponov S. V., Kopjev P. S.,
Panov V. I., Poltoratsky E. A., Sibeljdin N. N., Suris R. A.**
Nanomaterials and Nanotechnologies 3

The materials of the reports in the condition and the development of nanotechnology and nanomaterials creation discussed in the meetings of the year's collection of the Russia academy of sciences and the Ministry of the industry, science and technologies of Russia Federation are stated. The acquaintance of the readers of the journal with point of view of the leading scientists of the Russia to the perspectives of nanotechnology will make possible to get the objective estimate of the future efforts in this area of the knowledges.

Kotov V. N., Cherepakhin I. I. *The Integral Silicon Microthermoanemometer for Measurement of the Flow of Fluid and Gaseous mediums* 14

The integral silicon microthermoanemometer as a universal sensor for construction of flow transducers of fluid and gaseous mediums is presented. The design which allow to use the different schemes of including of heater and temperature sensitive resistive components for regulation of parameters of process of measurement of flow velocity is offered. The methods of measurements of the flow used at making of thermal flowmeters on the basis of a microthermoanemometer are shown.

Reznik A. L., Efimov V. M. *The Increase of the Space Resolution of the Digital Representations and Signals with the Help of the Regulative Subpoint Scan* 20

The method is suggested, it's developed and justified the constructive algorithm of the fast solution in the space area of the inverse incorrect problem concerned with the estimation of the initial representation by the collection of the observed "greased" representations of low resolution having the regular coordinate displacement.

Vasiljev V. A. *Synergetics Principles and the Manifestation of the Synergetic Appearances in the Structures of the Ionic Semiconductors* 26

The development of the new interdisciplinary direction synergetics is researched. The principles, problems and subject of the investigation of the synergetics are determined and realized. The necessary and sufficient conditions when it is possible the selforganization in system are discovered. The rigid solutions of the semiconductors alloyed by the different ingredients are considered and the manifestation of the interaction of the systems elements and their selforganization on microlevel is investigated. The interact of the lattice's elements of solid state structure and free charge mediums with use relative to not complicated model is studied.

**Letuta S. N., Lantukh Yu. D., Pashkevitch S. N.,
Alidjanov E. K.** *Photosensitized Reactions in Dyed Solutions of Nucleic Acids* 34

Processes of nucleic acids selected modification by visible range laser radiation are examined. Organic nanostructures synthesized on the biopolymers serve as the photosensitizers of the reactions in solutions.

Zajchuk R., Sullivan G. R. *The Individual Monitoring of a Soldier, Microinstrument and Telemedicine: Condition and Perspective* ... 41

The great soldiers' death-rate of wounds in modern battle operations demands the development of life-saved foremost technologies good for use both on the field of the battle and in army medicine centers. The results of the investigations of the Medicine Department of the Army Department of the USA Defence on the elaboration of such technologies.

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.