

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 1 (90) ✧ 2008

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Издается с 1999 г.

Главный редактор
Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора
Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В.
Асеев А. Л.
Гапонов С. В.
Каляев И. А.
Климов Д. М.
Ковальчук М. В.
Мокеров В. Г.
Никитов С. А.
Сигов А. С.
Чаплыгин Ю. А.
Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.
Андреевский Р. А.
Антонов Б. И.
Арсентьева И. С.
Астахов М. В.
Быков В. А.
Волчихин В. И.
Горнев Е. С.
Градецкий В. Г.
Гурович Б. А.
Журавлев П. В.
Захаревич В. Г.
Кальнов В. А.
Карякин А. А.
Квардаков В. В.
Колобов Ю. Р.
Кузин А. Ю.
Мокров Е. А.
Нарайкин О. С.
Норенков И. П.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросянц К. О.
Петрунин В. Ф.
Путилов А. В.
Пятышев Е. Н.
Сауров А. Н.
Серебряников С. В.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.
Тимошенков С. П.
Тодуа П. А.

Отв. секретарь
Лысенко А. В.

Редакция:
Безменова М. Ю.
Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:
Издательство
"Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Вернер В. Д., Иванов А. А., Коломенская Н. Г., Лучинин В. В., Мальцев П. П., Попова И. В., Сауров А. Н., Телец В. А. Изделия микросистемной техники — термины и определения, классификация и обозначения типов 2

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Лучинин В. В. Наноиндустрия и "человеческий капитал". 6
Агеев О. А., Коноплев Б. Г., Поляков В. В., Светличный А. М., Смирнов В. А. Исследование режимов фотонно-стимулированной зондовой нанолитографии методом локального анодного окисления пленки титана 14
Козлов А. Г. Тепловые микросенсоры: конструктивные особенности. 16
Яшин К. Д., Осипович В. С., Божко Т. Г. Разработка МЭМС 28
Галушков А. И., Сауров А. Н., Погалов А. И. Моделирование, динамический и прочностной анализ инерциальных чувствительных наноэлементов 34

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Гриднев С. А., Горшков А. Г., Ситников А. В., Самалюк Н. В. Влияние электрического поля на процесс кристаллизации тонкопленочных аморфных нанокмполитов металл — сегнетоэлектрик 38
Марахтанов М. К., Духопельников Д. В., Мэй Сянь Сю. Дисперсионные характеристики наноразмерных металлических пленок в видимом диапазоне излучения 42

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Брюхова Ю. В., Зайцев Н. А. Анализ разброса физико-технических параметров полупроводниковых приборов. 48
Ахметов Д. Г., Косцов Э. Г., Соколов А. А. Микроэлектромеханические электростатические высокопроизводительные инжекторы микроструй жидкости 53
Мокров Е. А., Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е. Модель неинформативного преобразования термоЭДС МЭМС-структур тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления при воздействии нестационарных температур 61

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

Векшин М. М., Яковенко Н. А. Характеристики плазмонно-резонансных биосенсоров на основе субмикронных дифракционных решеток 65

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Хорунжий И. А., Доманевский Д. С., Бобученко Д. С. Компьютерная оптимизация параметров радиатора для охлаждения мощного полупроводникового прибора 70

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ 75

Contents 80

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

Аннотации статей журнала и требования к оформлению статей доступны на сайте журнала:
<http://www.microsystems.ru>. E-mail: nmst@zknnet.ru

ПОДПИСКА:

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

УДК 621.3.049.7

В. Д. Вернер¹, д-р физ.-мат. наук, проф.,

А. А. Иванов², канд. техн. наук,

Н. Г. Коломенская³, канд. экон. наук,

В. В. Лучинин⁴, д-р техн. наук, проф.,

П. П. Мальцев⁵, д-р техн. наук, проф.,

И. В. Попова⁶, д-р наук,

А. Н. Сауров¹, д-р техн. наук, проф.,

В. А. Телец², д-р техн. наук, проф.

¹ ГУ НПК "Технологический центр" (МИЭТ),

² 22 ЦНИИ Минобороны России,

³ ОАО "РНИИ "Электронстандарт",

⁴ ГОУ ВПО СПбГЭТУ им. В. И. Ульянова (ЛЭТИ),

⁵ Секция прикладных проблем при Президиуме РАН,

⁶ ЗАО "Гирооптика"

ИЗДЕЛИЯ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ — ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ ТИПОВ

Впервые в отечественной практике публикаций представлены термины, определения и буквенные обозначения в системе параметров и характеристик в области изделий микросистемной техники, их классификация и обозначения типов.

Предлагаемая публикация является тематическим продолжением работы [1] в части терминов, определений и буквенных обозначений системы параметров и характеристик изделий микросистемной техники (МСТ).

Функционально МСТ представляют собой интегрированные информационно-управляющие системы, структурно объединяющие подсистемы сбора и обработки информации в реальном масштабе времени для последующей выработки воздействий на исполнительные элементы и, в конечном счете, на объект управления [2—4].

МСТ, как правило, выполняются на основе базовых и (или) модифицированных технологических процессов микроэлектроники и содержат электронное устройство (прием, нормирование, первичное и вторичное преобразование сигналов, обработка, хранение, распределение и передача информации на актюатор) и исполнительное устройство (актюатор, силовое оконечное устройство).

Функции электронных управляющих устройств выполняют: чувствительные элементы преобразователей физических величин и компонентов датчиков (ПФВ ИКД); аналоговые мультиплексоры или аналоговые ключи и коммутаторы; устройства выборки и хранения; операционные и измерительные усилители; фильтры; аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи; компараторы напряжения; микропроцессоры и цифровые процессоры обработки сигналов; цифровые и логические схемы; запоминающие устройства; аналоговые демultipлексоры и др. [5].

Функции исполнительных устройств выполняют различные микроэлектромеханические, микрооптоэлектромеханические, микрофлюидные и иные устройства и их функциональные узлы в виде микродвигателей, элементов гидравлики, сопел, поршней, захватов, зацепов, редукторов, шестерней, зеркал и т. п. [6, 7].

Указанные функциональные подсистемы МСТ (или неполные микросистемы (1)) структурно могут состоять из различных наборов перечисленных выше электронных и, например, микромеханических устройств, и поэтому описываться по входам и выходам через принадлежащие этим устройствам параметры и характеристики. Тогда такие параметры и характеристики переходят в принадлежность МСТ в целом и описывают их технические и эксплуатационные свойства, увязываются с энергетическими, временными и надежностными показателями.

В соответствии с этой логикой характеристики входного сигнала МСТ становятся информативным параметром, связанным с измеряемой (контролируемой, преобразуемой) входной физической величиной, а характеристики выходного сигнала являются информативными параметрами на выходе МСТ. Указанные группы параметров и характеристик по входам и выходам увязаны между собой через заданную целевую функцию МСТ.

Система требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации изделий МСТ, как и других изделий в составе электронной компонентной базы, основывается на унифицированной системе параметров и характеристик, которые описывают функциональные, технические и эксплуатационные свойства изделий. В частности, на МСТ распространены [8] положения ГОСТ 17021 "Микросхемы интегральные. Термины и определения", ГОСТ 17467 "Микросхемы интегральные. Основные размеры", ГОСТ 18682 "Микросхемы интегральные. Система условных обозначений", ГОСТ 19480 "Микросхемы интегральные. Термины, определения и буквенные обозначения электрических параметров", ГОСТ Р 51068 "Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения" и ряда других стандартов группы однородной продукции "микросхемы интегральные".

Технический уровень МСТ может быть представлен через совокупность входных, выходных, статических, динамических, энергетических, конструктивно-технологических и эксплуатационных параметров и характеристик.

Входные параметры и характеристики описывают вид, форму, амплитуду, диапазон изменений входных сигналов, входное сопротивление и емкость, число каналов приема информации: выходные параметры — вид, форму (аналоговую или цифровую), амплитуду, диапазон изменения, нагрузочную способность, число каналов распределения информации.

Статические параметры описывают разрешающую способность (чувствительность), погрешности преобразования (отнесенные к статическим — основная, дополнительная, аддитивная, мультипликативная, аппроксимации, линейности и проч.), а динамические параметры — быстродействие (времена задержки прохождения сигнала через устройство) и погрешности преобразования, отнесенные к динамическим.

Энергетические параметры указывают напряжения источников питания и опорных источников напряжения, токи потребления от указанных источников энергии, мощности рассеяния и потребления.

В эксплуатационных характеристиках приведены данные по устойчивости к воздействию дестабилизирующих факторов (климатических — температуры, давления, влаги и т. п.; специальных — радиационных излучений и агрессивных сред; механических — вибраций, линейных ускорений и т. п.; биологических — плесени, грибов; изменений значений питающих и опорных напряжений и др.).

Конструктивно-технологические особенности конкретных типов МСТ могут быть выражены через систему идентификации вида исполнения (корпусное, бескорпусное, гибридно-модульное), значений статических потенциалов и проч.

Параметры и характеристики, в наибольшей степени выражающие специфические точностные и системные особенности МСТ, в первом приближении могут быть представлены в следующей, далеко не полной, совокупности [9, 10]:

- чувствительность — характеристика изделия, определяемая отношением изменения выходного сигнала к вызываемому его изменению измеряемой (контролируемой) физической величины;
- абсолютная аддитивная чувствительность к влияющей физической величине — чувствительность изделия, определяемая отношением максимального изменения входного сигнала при нулевом значении измеряемой (контролируемой) физической величины к изменению влияющей физической величины в пределах рабочей области значений;
- относительная аддитивная чувствительность к влияющей физической величине — чувствительность изделия, определяемая отношением абсолютной аддитивной чувствительности к значению влияющей физической величины;
- абсолютная мультипликативная чувствительность к влияющей физической величине — чув-

ствительность изделия, определяемая отношением приращения коэффициента преобразования к вызвавшему его приращению значению влияющей физической величины;

- относительная мультипликативная чувствительность к влияющей физической величине — чувствительность изделия, определяемая отношением абсолютной мультипликативной чувствительности к значению влияющей физической величины;
- функция преобразования — зависимость информативного параметра выходного сигнала изделия от информативного параметра его входного сигнала с учетом внешних влияющих физических величин;
- статическая погрешность — погрешность при измерении (контроле) постоянной физической величины;
- динамическая погрешность — погрешность при измерении (контроле) переменной во времени физической величины;
- систематическая погрешность — составляющая погрешности, значение которой остается постоянным или закономерно изменяющимся при повторных измерениях (контроле) и преобразовании физической величины;
- случайная погрешность — составляющая погрешности, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях (контроле) и преобразовании физической величины;
- дополнительная погрешность — составляющая погрешности, возникающая вследствие отклонения влияющей физической величины от нормального значения или вследствие выхода ее за пределы нормальной области значений;
- погрешность аппроксимации — погрешность, определяемая различием градуировочной характеристики и его номинальной функции преобразования;
- погрешность линейности — погрешность аппроксимации при линейной функции преобразования;
- время преобразования (отклика) — интервал времени от момента начала изменения входного сигнала до момента появления соответствующего выходного сигнала;
- частотный диапазон — диапазон частот, в котором обеспечивается заданная неравномерность амплитудно-частотной характеристики.

Как отмечалось ранее, указанная совокупность параметров может быть дополнена любым набором параметров и характеристик, функционально принадлежащим устройствам и узлам на входах и выходах МСТ конкретного класса и (или) типа.

Реализация МСТ в виде единой интегрированной системы или же в виде набора функциональных подсистем предполагает возможным использование свойства дуальности терминов, характеризующих сигналы на их входах и выходах (рис. 1, 2), которые в зависимости от того, рассматривается изделие микросистемной техники (микросистема) в целом или по функциональным частям (электронная ин-

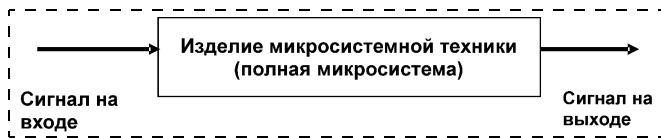


Рис. 1. Сигналы на входе и выходе интегральной полной микросистемы

формационно-управляющая микросистема или микросистема исполнения).

Авторами проведен анализ всей имеющей смысл совокупности наборов параметров и характеристик, описывающих технический уровень и эксплуатационные свойства МСТ. Известными эвристическими методами определен состав базовых параметров и характеристик, рекомендуемых к использованию при составлении технических заданий на разработку МСТ и технических условий на поставку.

Представленные ниже термины, определения и буквенные обозначения параметров и характеристик МСТ увязаны между собой и систематизированы.

Активация, a : физико-химическое воздействие на входе микросистемы с целью ее перехода из одного заданного состояния в другое.

Градуировочная характеристика, F_r : заданная зависимость сигнала на выходе микросистемы от поставленного ему в соответствие сигнала на входе.

Передачная характеристика, F_n : зависимость сигнала на выходе микросистемы от значений сигнала на ее входе, принятая во времени и в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов.

Нелинейность, ΔL : максимальное отклонение значений передаточной характеристики микросистемы от ее градуировочной характеристики.

Разрешающая способность, v_a : наименьшее приращение сигнала на входе микросистемы, приводящее к ее активации.

Порог срабатывания, v_n : значение сигнала на входе микросистемы, наименьшее приращение которого относительно нулевого значения приводит к заданному изменению сигнала на выходе.

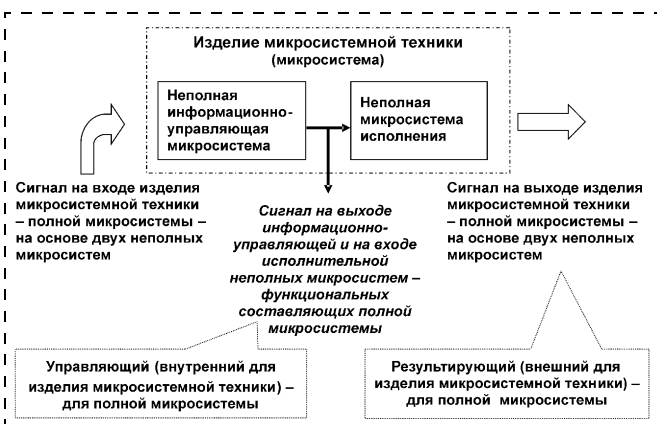


Рис. 2. Сигналы на входе и выходе многокристалльной (гибридной) полной микросистемы (курсивом — сигналы на выходе и входе неполных микросистем, как функциональных составных частей полной микросистемы)

Воспроизводимость, R : заданное соответствие значений сигнала на выходе микросистемы по циклам работы при постоянном значении сигнала на входе.

Выходной шум, $n_{\text{вых}}$: флуктуации сигнала на выходе микросистемы в отсутствие сигнала на входе.

Время срабатывания, $t_{\text{ср}}$: характеристика быстрого действия микросистемы, выраженная во времени отклика сигнала на выходе.

Дрейф сигнала на выходе, Δ : изменение сигнала на выходе микросистемы при воздействии внешних дестабилизирующих факторов при постоянном сигнале на входе.

Амплитуда сигнала на выходе, $A_{\text{п.ш}}$: максимальное значение сигнала на выходе микросистемы, соответствующее значению полной шкалы диапазона воздействия сигнала на входе.

Гистерезис, h : разница между значениями сигналов на выходе микросистемы при равнозначных сигналах различной полярности на входе.

Мертвый ход: участок холостого хода передаточной характеристики микросистемы после смены полярности сигнала на входе.

Пороговая характеристика, $F_{\text{пор}}$: переходная характеристика, отражающая изменения сигнала на выходе микросистемы при ступенчатом воздействии сигнала на входе.

Стабильность, S : способность микросистемы выполнять функции при сохранении параметров в пределах установленных норм в процессе, и после воздействия внешних дестабилизирующих факторов.

Смещение нуля передаточной характеристики, ΔF_0 : смещение передаточной характеристики микросистемы в ее нулевой точке, проявляющееся в наличии сигнала на выходе при отсутствии сигнала на входе.

Дрейф смещения нуля передаточной характеристики, $\Delta F_{\text{см. 0}}$: нестабильность смещения нуля передаточной характеристики микросистемы при воздействии внешних дестабилизирующих факторов и старения.

Время готовности, $t_{\text{гот}}$: интервал времени от момента подачи напряжения питания до выхода микросистемы в заданный режим функционирования.

Диапазон выходного сигнала, $\Delta K_{\text{вых}}$: область значений передаточной характеристики микросистемы, в пределах которой нормирована погрешность сигнала на выходе.

Определенность в области системы базовых параметров и характеристик МСТ позволила определиться с рациональной классификацией [11] и системой идентификации их типов.

Как уже отмечалось в настоящей статье, МСТ подразделяют на информационно-управляющие (неполные микросистемы), исполнения (неполные микросистемы) и полные (совмещенные информационно-управляющие микросистемы и микросистемы исполнения).

К классификационным признакам МСТ принято относить принцип действия, вид конструктивно-технологического исполнения, вид входного сигнала (физической величины), вид выходного сигнала (воздействия).

По принципу действия МСТ подразделяют на электромеханические, оптоэлектромеханические, теплофизические, флюидные, биотехнические.

По виду исполнения МСТ подразделяют на интегральные, гибридные и модульные.

По виду входного сигнала МСТ подразделяют на микросистемы, воспринимающие следующие физические величины (воздействия): температуру, давление, скорость, ускорение, силу, электрический сигнал, излучение, поле, состав среды, концентрацию вещества, иное.

По виду выходного сигнала (воздействия) МСТ подразделяют на изделия с сигналами: электрическим, оптическим, механическим, тепловым, химическим (биохимическим), иным.

Условное обозначение МСТ для полной технической идентификации типа должно состоять из следующего набора символов:

$$\underbrace{XXX}_1 \underbrace{X}_2 \underbrace{XXX}_3 \underbrace{XXX}_4 \underbrace{XX}_5 \underbrace{X}_6 \underbrace{X}_7 \underbrace{X}_8 \underbrace{X}_9,$$

где 1 — категория качества изделия (обозначается соответствующим набором из двух или трех буквенных знаков);

2 — вид исполнения: 1, 3, 5, 6, 7, 9 — интегральные изделия; 2, 4, 8 — гибридные изделия; 0 — гибридно-модульные изделия;

3 — номер разработки конкретного вида исполнения (состоит из трех цифр (000 до 999) или двух цифр (от 00 до 99); вторая и третья позиции в данном элементе условного обозначения МСТ в совокупности составляют номер серии изделия);

4 — обозначение вида изделия (МСТ — полная; МСУ — информационно-управляющая и МСИ — исполнительная микросистемы);

5 — номер разработки конкретного изделия в серии (состоит из одной или двух цифр (от 1 до 99));

6 — буквенное обозначение вида входного сигнала (физической величины или воздействия); А — акустическое давление; Б — биологические и одорантные факторы; Г — концентрация вещества в газовой среде; Д — давление (разность давлений и т. п.); Е — изменение емкости; Ж — концентрация вещества в жидкости; Л — линейное ускорение; М — механическое воздействие; О — оптический сигнал, световой поток; П — магнитное поле, магнитный поток; Р — радиационные излучения; С — сейсмическое воздействие; Т — температура, перепад температур, тепловой поток; У — угловая скорость; Х — химические, взрывчатые и отравляющие вещества, агрессивные среды; Э — электрический сигнал; И — иное);

7 — буквенное обозначение вида выходного сигнала — воздействия; А — аналоговый электрический сигнал; Б — биологическое воздействие; М — механическое воздействие; О — оптический сигнал; П — пиротехническое воздействие; Ц — цифровой электрический сигнал; Х — химическое воздействие; И — иное);

8 — буквенное обозначение, указывающее на отличие типоминимала микросистемы в составе одного типа по условиям эксплуатации, значениям нор-

мируемых параметров и т. п. (содержит буквы русского алфавита от А до М (кроме З и Й), отсутствие обозначения указывает на отсутствие таких отличий для изделия конкретного типа);

9 — обозначение видов корпуса или бескорпусного исполнения (Н — бескорпусное исполнение; П — корпус 1-го типа; Р — корпус 2-го типа; С — корпус 3-го типа; Т — корпус 4-го типа; У — корпус 5-го типа; Ф — корпус 6-го типа). Типы корпусов приведены в соответствии с ГОСТ 17467. При использовании корпуса, разработанного для типа (типоминала) конкретного изделия, его обозначение не приводится.

Пример полного условного обозначения МСТ типа 1999МСТ2ТМАУ, где

1 — исполнение интегральное; 999 — номер разработки; МСТ — полная микросистема; 2 — номер разработки в серии 1999; Т — входная физическая величина — температура; М — выходное воздействие — механическое; А — типоминимал группы "А"; У — в корпусе 5-го типа.

Представленные в публикации технические материалы могут быть положены в основу соответствующих нормативных документов в области МСТ.

Авторы выражают глубокую признательность С. М. Алфимову за поддержку в проведении исследований и практических работ по проблематике изделий микросистемной техники и благодарность коллегам Борисенко Г. И., Караваеву В. В., Митину Ю. В., Мосичевой Л. И., Негиной Ю. С., Сирыченко Н. А., Соболеву В. А., Тохтуевой Н. С. за непосредственное участие и помощь в проведении работ.

Список литературы

1. **Изделия** микросистемной техники — основные понятия и термины // В. Д. Вернер, Н. Г. Коломенская, В. В. Лучинин, В. А. Телец и др. // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12.
2. **Вернер В. Д., Пурцхванидзе И. А.** Микросистемы: проблемы и решения // Микросистемная техника. 2002. № 10.
3. **Королев М. А., Чаплыгин Ю. А., Тихонов Р. Д.** Интегрированные микросистемы — перспективные элементы микросистемной техники // Микросистемная техника. 2003. № 7.
4. **Иванов А. А., Мальцев П. П.** Микросистемная техника — основа научно-технической революции в военном деле // Микросистемная техника. 2004. № 10.
5. **Лучинин В. В., Степанов Ю. И., Телец В. А.** Микросистемная техника. Прикладные области применения. М.: Изд. МИРЭА (ТУ), 2004.
6. **Мальцев П. П., Никифоров А. Ю., Телец В. А.** Микроактюаторы. М.: Изд. МИРЭА (ТУ), 2004.
7. **Телец В. А.** Микроэлектромеханические инерционные преобразователи физических величин: типовые варианты исполнения // Микросистемная техника. 2004. № 2.
8. **Телец В. А., Негина Ю. С., Орлов А. А.** Направления, базовые составляющие и условия развития микросистемной техники специального назначения // Изв. высших учебных заведений. Электроника. 2005. № 6.
9. **Вернер В. Д.** К терминологии в микросистемной технике // Микросистемная техника. 2005. № 9.
10. **Кузин А. Ю., Мальцев П. П., Телец В. А.** О терминах в микросистемной технике // Микросистемная техника. 2002. № 10.
11. **Мальцев П. П.** О классификации в микросистемной технике // Микросистемная техника. 2005. № 1.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 621.38

В. В. Лучинин, д-р техн. наук, проф.,
Центр микротехнологии и диагностики
Санкт-Петербургского государственного
электротехнического университета

НАНОИНДУСТРИЯ И "ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ КАПИТАЛ"

Введение

В социально-экономических приоритетах любого индустриального государства особое место должно занимать развитие наукоемких отраслей производства с высоким уровнем добавленной стоимости. Лидерами мировой экономики на современном этапе в качестве такого направления определена **наноиндустрия**.

В рамках современных представлений это *интегрированный комплекс, включающий оборудование, материалы, программные средства, систему знаний; технологическую, метрологическую, информационную, организационно-экономическую культуру и кадровый потенциал, обеспечивающие производство наукоемкой продукции, основанной на использовании новых, нетрадиционных свойств материалов и систем при переходе к наномасштабам*.

За сравнительно короткий промежуток времени укрепились представления о том, что:

- приставка "нано" — *"скорее особое обобщенное отражение объектов исследований, прогнозируемых явлений, эффектов и способов их описания, чем простая характеристика протяженности базового элемента"*, которая формально определена от единиц до ста нанометров;
- *базовые понятия с приставкой "нано" должны наиболее полно отражать именно проявление функционально-системных свойств материалов, процессов и явлений, а не только чисто геометрические параметры объектов*.

Область знаний о материальных системах, а также о процессах с приставкой "нано" на определенный период времени объединила ученых и инженеров с политиками и чиновниками, поскольку в этом, пока еще "карлике", просматриваются очертания "гиганта" как определенной панацеи — *объединяющей системной идеи*, открывающей возможности:

- реальной диверсификации экономики для придания устойчивости государству через интеллектуальную, а не сырьевую, сферу деятельности;
- обеспечения экономической безопасности за счет быстрого и устойчивого вхождения на мировой рынок конкурентоспособной продукции с высоким уровнем наукоемкой добавленной стоимости;

- воплощения декларируемых принципов сохранения и развития "человеческого капитала" за счет эффективного использования ранее накопленного научно-образовательного потенциала и широкого применения экономически эффективных новых высоких технологий в системе здравоохранения, обеспечения продовольственной и экологической безопасности;
- достижения паритета и превосходства в наукоемких военных и специальных технологиях, обеспечивающих внешнюю и внутреннюю безопасность государства.

Выбор в качестве приоритетного направления наноиндустрии позволяет решать две основные задачи:

- **экономическую** — повышение эффективности производства за счет минимизации сырьевой составляющей в стоимости продукта при резком возрастании **интеллектуально добавленной стоимости**;
- **социальную** — сохранение и развитие "человеческого капитала" как базового фактора существования независимого государства, обладающего экономическими, научно-техническими и кадровыми ресурсами для производства конкурентоспособной наукоемкой продукции, а также обеспечивающего для своих граждан востребованный современный уровень образовательных услуг и социально "комфортную" среду проживания.

Фактически наноиндустрия ориентирована на создание интеллектуальной и материальной продукции *с высоким уровнем добавленной стоимости, формируемой (определяемой) интеллектуальным вкладом "человеческого капитала" — носителя генетического, культурного и технологического наследия*.

Естественно-научный базис наноиндустрии

Уникальность направления "нано" определяется тем, что данное направление может оказаться востребованным различными социальными слоями и профессиональными группами общества, поскольку продукция наноиндустрии — это *интеллектуальная и материальная наукоемкая продукция с ранее не достижимыми технико-экономическими показателями, создаваемая с широким применением новых материалов, технологических процессов и методов контроля. Она ориентирована и востребована при решении задач обеспечения обороноспособности, безопасности и технологической независимости государства, реализации социально и экономически значимых национальных проектов в области образования и здравоохранения, повышения качества и разнообразия современных товаров и услуг*.

Базисом наноиндустрии является система знаний, основанная на описании, объяснении и пред-

сказании свойств материальных объектов с нанометрическими характеристическими размерами или объектов более высокого метрического уровня, упорядоченных или самоупорядоченных на основе наноразмерных элементов, **т. е. наука о "нано"**.

Формально **нанотехнология** на основе системы знаний, умений и аппаратурно-информационного обеспечения реализует совокупность научно обоснованных действий для практического материального воплощения идей "нанонауки" в виде "нанотехники", т. е. интеллектуальной и материальной продукции: машин, механизмов, приборов, устройств и материалов, созданных *с использованием новых, ранее не известных свойств и функциональных возможностей материальных систем при переходе к наномасштабам, определяемых особенностями процессов переноса и распределения зарядов, энергии, массы и информации при наноструктурировании*.

В этих условиях особая роль принадлежит созданию, развитию или переосмыслению естественно-научного базиса. В основе системного упорядочения знаний об объекте исследований, безусловно, лежит анализ его вещественно-материального базиса, структурного упорядочения, пространственно-временной организации и устойчивости, а также количественное и качественное проявление традиционных и ранее неизвестных свойств в зависимости от условий синтеза и функционирования.

Фундаментальным базисом наноиндустрии являются новые ранее неизвестные свойства материалов и систем, возникающие при переходе к объектам, представляющим собой интеграцию искусственно или естественно упорядоченных наносистем. Это обусловлено особым проявлением в наноконпозициях и ансамблях субмолекулярных комплексов квантово-размерных, кооперативно-синергетических и так называемых "гигантских" эффектов, а также коллективных явлений и процессов.

В настоящее время, по нашему мнению, в качестве направлений фундаментальных исследований в области наноиндустрии следует особо выделить:

- ансамбли молекул, межмолекулярные взаимодействия и молекулярную динамику;
- размерные и функциональные свойства наночастиц, межфазные границы, конформации, морфологическое многообразие;
- наномасштабирование и квантово-размерные эффекты;
- кооперативные, коллективные явления и эффекты при переносе заряда и энергии;
- неравновесные процессы и синергетические эффекты при синтезе наноструктурированных материалов;
- матричный синтез, сборку, самосборку и молекулярное узнавание веществ в условиях органической и неорганической природы.

Особая роль в наноиндустрии принадлежит **междисциплинарным исследованиям**.

Известные междисциплинарные технологии "BIO-ICT", "MASSIVE-ICT", "SMART-ICT" для достижения поставленных целей создания информационно-коммуникационных систем нового поколения используют объекты органической природы, комби-

нации органических и неорганических структур, а также ориентируются на присущие (наиболее часто) живым системам явления самоорганизации, адаптации и обучения, причем для их наиболее эффективного проявления создаются сверхбольшие массивы (до 10^{13}) традиционных базовых электронных элементов на кристалле, которые в условиях влияния наноразмерного фактора вступают в синергетическое взаимодействие.

Последний факт непосредственно связан с достаточно частым обращением в литературе по нанотехнологии к парадигме: **"Сверху-вниз или снизу-вверх"**. Формально речь идет о двух возможных направлениях достижения конечного результата в условиях создания объектов индустрии наносистем.

Первое направление — это фактически **физический редукционизм** — **"от большого к малому"** путем многократного уменьшения исследуемого (создаваемого) объекта. Так развивается классическая нанотехнология интегральных схем, которая уже давно преодолела 100-нанометровый рубеж. Однако конструирование сложного многоэлементного многоуровневого изделия (например, интегральной схемы) требует системной интеграции для придания целостности системе.

Второе направление реализуется в рамках **целостного**, так называемого **холического подхода** (от греческого — целый, весь), когда исследуют системные свойства искусственно синтезируемого или самоорганизующегося объекта, в основе которого лежат наноразмерные элементы, что наиболее типично для технологии наноматериалов. Последнее направление имеет много общего с первым, так как в рамках эволюционного развития первого направления технологически уже достигнуты элементы с такими размерами (например, 22 нм), при которых их интеграция (самоорганизация) приведет к возникновению функциональных свойств, типичных для кооперативных целостных систем.

На данный момент уже сформировалась временная шкала и определена временная динамика создания и промышленного внедрения наносистем как материальных объектов в виде упорядоченных или самоупорядоченных, связанных между собой элементов с нанометрическими характеристическими размерами, кооперация которых обеспечивает возникновение у объекта новых свойств, определяемых проявлением наномасштабных факторов.

Четыре временных периода наиболее ярко характеризуются началом целенаправленных работ по следующим видам наукоемкой продукции:

- 2000 г. — **пассивные наносистемы-наноматериалы** (наноструктурированные материалы, аэрозоли, гели, коллоиды, используемые как покрытия и самостоятельные дисперсные среды);
- 2005 г. — **активные наносистемы-наноустройства** (наноконпозиции для электроники, фотоники, биологии, механики);
- 2010 г. — **интегрированные микросистемы на основе наноразмерных систем** (интеллектуальные системы на основе двухмерной и трехмерной искусственной интеграции и самоорганизации с

максимальным проявлением наноразмерных эффектов и процессов);

- 2015—2020 годы — **молекулярные наносистемы** (кластерные макромолекулярные комплексы, в том числе междисциплинарные, с конвергенцией объектов живой и неживой природы).

Более глубокое познание и, безусловно, использование возможностей материального мира на микро- и, особенно, наноразмерных уровнях (когда фактически становится безразличной исходная принадлежность атома или молекулы к объекту органической или неорганической природы) создает предпосылку к синтезу искусственных, ранее не известных в природе, *систем не просто по составу и (или) структуре, но и, в первую очередь, по свойствам, а следовательно, функциональным возможностям.*

Определяя основные принципы столь бурного развития интегрированных систем на основе наноразмерных элементов, конвергентных систем на основе интеграции наноразмерных систем различной природы (органической, биоорганической, неорганической), выделим:

- физические и технологические ограничения интеграции и миниатюризации в условиях классических неорганических сред и традиционных схемотехнических решений;
- ориентацию на среды и системы с множеством структурно-устойчивых состояний (полиморфизм);
- ориентацию на среды и системы, обеспечивающие перенос заряда и энергии с минимумом потерь;
- ориентацию на среды и системы, обеспечивающие внутреннюю "генерацию" информации и энергии, в том числе за счет особого взаимодействия с внешней средой;
- ориентацию на среды и системы с кооперативными принципами обработки информации, обеспечивающими распределенность, параллельность, ассоциативность, сверхсенсорность и надежность;
- ориентацию на среды и системы, обладающие максимальной физиологической совместимостью с человеческим организмом и информационной адаптивностью к алгоритмам его функционирования.

Особую роль приобретает именно "интерфейс" между живой и неживой природой. Современное состояние вопроса в области разработки и создания устройств на основе биосред и их аналогов характеризуется следующими направлениями:

- использование биосред в традиционных приборах, например, применение в качестве материалов затвора полевого транзистора или оптического волновода;
- использование биосред в реализации прецизионных технологических операций, например биолитографии с наномолекулярным разрешением;
- создание биосенсоров и актюаторов инвазивного и неинвазивного типов для диагностики и биокоррекции состояния организма;
- создание функциональных биопротезов, обеспечивающих замещение утраченных органов или функций (слух, зрение и даже обоняние);

- попытка создания сверхмощных систем искусственного интеллекта на основе бионейрочипов и сред с нейроподобной структурой.

При рассмотрении биосред как одного из элементов базиса для создания конвергентных искусственных интеллектуальных и сенсорных наносистем будущего, в первую очередь, следует обращать внимание на функционально-технологические особенности, определяемые структурными конформационными свойствами биомолекул и композиций на их основе, в том числе с участием неорганических матриц. При этом следует учитывать, что конформация является результатом энергетической адаптации на молекулярном уровне. Абстрагируясь от принципов обработки и анализируя только функционально-вещественный базис трех наиболее перспективных направлений использования биосред (биосенсоры, биопротезы и "биокомпьютеры"), невозможно не обратить внимание на следующие известные особенности биосред, привлекательные для создания на их основе интегрированных систем как в функциональном, так и в технологическом аспектах:

- *"биофизическое"* преобразование информации, характеризующееся кооперативными нелинейными процессами, глубоким распараллеливанием информационных каналов и генерацией информации;
- *"биохимическое"* усиление, характеризующееся встроенными источниками энергии и электрического потенциала в сочетании с переносом заряда и энергии практически без потерь;
- *селективность* по отношению к внешним информационным и технологическим возмущениям, обеспечивающая локализацию и избирательность воздействия;
- синтез сред и систем с использованием *процессов матричного копирования, самосборки, самоорганизации, отбора и даже размножения.*

Таким образом, **биоорганические и конвергентные бионеорганические надмолекулярные композиции за счет структурно-морфологического и химического многообразия, а также особенностей переноса в них энергии, заряда и проявления свойств, присущих биосредам, могут рассматриваться как основа "функциональных" сред будущего, характеризующихся сверхбольшой информационной емкостью, высокой удельной энергонасыщенностью, селективностью к внешним воздействиям, ассоциативностью и распределенностью процессов обработки информации.** В них также могут сочетаться процессы функционирования и самообновляющегося синтеза. Неорганический элемент надмолекулярной композиции может выполнять не только функции субстрата, но и активной диагностирующей или исполнительской среды.

В рамках обобщения базовых направлений работ в области фундаментальных исследований применительно к созданию естественного научного базиса "Наноиндустрии", безусловно, представляют интерес:

- кристаллохимия наноматериалов;
- молекулярная динамика и наномеханика;
- биомолекулярная инженерия;
- термодинамика наносистем;

Эволюционное поле "от микро- к наносистемам"

№	Характеристики систем	Эволюционное поле
1	Естественно-научный базис	<i>Монодисциплинарные:</i> электрические, оптические, механические <i>Междисциплинарные:</i> электромеханические, оптоэлектронные <i>Междисциплинарные</i> (конвергентные): биотехнические (материальный базис), бионические (принцип)
2	Базовые функциональные свойства	Усиление Генерация Пороговость Память Селективность Адаптивность Ассоциативность Кооперативность Самоорганизация
3	Характеристические размеры	Микроскопические Субмикроскопические Наноразмерные Атомно-молекулярные
4	Размерность в пространстве	1D (вискер), 2D (мембрана), 3D (кластер)
5	Структурная организация	Периодические Искусственно упорядоченные Апериодические Естественно упорядоченные (самоорганизующиеся)
6	Временная организация	Статические Динамические
7	Материаловедческий базис	Неорганические материалы Органические материалы Биоорганические материалы Бионеорганические материалы
8	Технологические принципы	Маска Селективность Самоорганизация Зонд Матрица
9	Конструктивная интеграция	Дискретные компоненты: в корпусе, бескорпусные Системы в корпусе (SiP) Системы на кристалле (SoC) Микро- и нанокластеры, в том числе конвергентные

- физико-химия нанодисперсных веществ;
- синергетические эффекты и самоорганизация в наносистемах;
- наномасштабирование и квантово-размерные эффекты;
- фундаментальные основы коллективных и транспортных явлений в наноразмерных системах;
- моделирование процессов структуроформирования наноматериалов.

Эволюционное поле "микросистемы — наносистемы" характеризует табл. 1.

Образовательные услуги в области "нано"

Интеллектуальный базис наносистем — это, безусловно, система знаний и умений, носителем которой является **"человеческий капитал"**. Основной формой инвестиций в "человеческий капитал" является предоставление образовательных услуг. Поэтому наряду с постановкой чисто экономической задачи — повышения эффективности производства на основе опережающего развития высокотехнологичных отраслей, необходимо решать и еще одну социальную задачу — **обеспечение требуемого интеллектуального уровня "человеческого капитала" через развитие научных исследований и предоставление образовательных услуг. Это связано с особой ролью интеллектуального фактора в конечных результатах данного наукоемкого направления и его влияния на долгосрочную перспективу любого государства.**

В рамках развития образовательного базиса России в области наноиндустрии Минобразованием России 4 июня 2003 года был издан приказ № 2398 "Об эксперименте по созданию нового направления подготовки дипломированных специалистов "Нанотехнология" и специальностей "Нанотехнология в электронике" и "Наноматериалы". Учебно-методический Совет по данному направлению возглавил академик Ж. И. Алферов.

На этапе становления "индустрии наносистем" как научно-технического направления наиболее целесообразной для достижения конечного результата (в условиях многообразия возможных путей развития) представляется подготовка квалифицированных кадров для научной и педагогической деятельности по многоуровневой системе "бакалавр — магистр — аспирант".

В апреле 2004 г. Минобразование России (Приказ № 1922 от 23.04.2004) по представлению УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации, действующего на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, приняло решение о подготовке бакалавров и магистров по направлению "Нанотехнология".

Целесообразность введения многоуровневой системы подготовки кадров по быстро прогрессирующему направлению обусловлена:

- объективной ситуацией в развитии данного высокотехнологичного направления, характеризую-

шейся стадией накопления знаний, т. е., в первую очередь, становлением "нанонауки";

- отсутствием не только в России, но и за рубежом, окончательной концепции развития "наноиндустрии" как промышленного производства, ориентированного на вполне определенную номенклатуру наноматериалов и компонентов наносистемной техники;
- необходимостью гармонизации структуры отечественного образовательного процесса по базовым направлениям научно-технического прогресса с концепцией, принятой большинством промышленно развитых стран в рамках Болонской декларации.

Многоуровневая система подготовки по направлению "Нанотехнология" получила значительную поддержку в высших учебных заведениях России. Министерством образования и науки Приказом № 197 от 12.07.2005 г. отменен эксперимент и окончательно введены в действие государственные образовательные стандарты по подготовке бакалавров, магистров и специалистов в рамках направления "Нанотехнология".

Многоуровневая система подготовки позволяет осуществлять более целенаправленную ориентацию образовательного процесса в рамках специальных дисциплин с учетом проблемного поля направления подготовки, отраженного в магистерских программах.

Анализ возможных образовательных программ при подготовке магистров, ориентированных на область "Наноиндустрия", позволил выделить в качестве наиболее востребованных следующие программы: физика наносистем; химия наносистем; материаловедение наносистем; процессы нанотехнологии; методы нанодиагностики; наноэлектроника; нанооптика; наномеханика; микро- и наноэнергетика; биомедицинские нанотехнологии.

В настоящее время принято важное государственное решение с точки зрения развития образовательно-научного процесса в области наноиндустрии. В рамках реализации Федеральной целевой программы "Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008—2010 годы" (Постановление Правительства Российской Федерации № 498 от 02 августа 2007 г.) в России создается нанотехнологическая сеть с участием более, чем 30 вузов. На их базе предполагается создать научно-образовательные центры по направлению "Нанотехнологии" с выделением вузам реальных инвестиций на развитие наукоемкой материально-технической базы.

Важнейшими элементами обеспечения качества высшего образования являются:

- кадровый потенциал, основанный на современных научно-педагогических школах, обеспечивающих преемственность поколений в сочетании с востребованностью и быстрой адаптацией к актуальным научно-техническим проблемам без потери глубины исследований и фундаментальности образования;
- лабораторно-экспериментальная база, позволяющая гармонично сочетать возможность получения знаний-знакомств и знаний-умений.

К сожалению, к началу XXI века экспериментальная база большинства вузов в высокотехнологичных

областях серьезно отставала от зарубежного уровня. Объемы средств, выделенных на реализацию инфраструктурных проектов по созданию научно-учебных центров "Нанотехнологии", в рамках существующих цен на уникальные научные приборы и технологическое оборудование позволят приобрести лишь единичные экземпляры, что не создаст возможности реализации целостной программы подготовки и переподготовки кадров для наноиндустрии. Поэтому возникла идея при сохранении за вузом возможности приобретения уникальных специализированных приборов для передовых, интегрированных в мировой и отечественный научно-исследовательский процесс научно-педагогических школ, часть средств, предоставляемых государством в рамках инфраструктурной программы "Наноиндустрия", направить для выполнения вузами важнейших образовательных функций подготовки и переподготовки кадров, а также популяризации знаний в своих регионах через создание комплексных учебно-научных малобюджетных лабораторий.

Их особенностью являются:

- модульный унифицированный характер лабораторной базы при широком охвате направлений для обеспечения, в первую очередь, знаний-знакомств;
- доступность в отношении размещения, эксплуатации и особенно приобретения оборудования. (Средняя стоимость модуля учебно-научной лаборатории в 5—10 раз меньше аналогичного исследовательского оборудования).

Модульный характер лаборатории позволяет подбирать требуемую номенклатуру малогабаритного технологического и контрольно-диагностического оборудования, имеющего соответствующее методическое обеспечение для быстрой адаптации к учебному процессу.

Базовая номенклатура модульного оборудования для "малобюджетной" учебно-научной лаборатории нанотехнологии и нанодиагностики представлена в табл. 2.

Таблица 2
Состав модульной унифицированной "малобюджетной" учебно-научной лаборатории "Нанотехнологии и нанодиагностика"

Технологии	Контроль и диагностика
Получение углеродных нанотрубок из газовой фазы	Оптическая микроскопия с электрической нанозондовой диагностикой
Молекулярная химическая сборка нитридов и оксидов	Растровая электронная микроскопия наносистем
Плазменное осаждение нанокластеров углерода и металлов	Атомно-силовая микроскопия наноразмерных объектов
Электрохимическое формирование нанопористого кремния	Эллипсометрия нанослоевых композиций
Золь-гель технология получения наноструктурированных оксидов	Оптическая спектроскопия наночастиц
Получение органических нанослоев методом Ленгмюра—Блоджетт	Электронный парамагнитный резонанс магнитных нанокластеров
Аmplификация ДНК методом полимеразной цепной реакции	Хроматография белков
	Капиллярный электрофорез коллоидных частиц

В настоящее время осуществляется также подготовка новых образовательных стандартов третьего поколения, в которых, к сожалению, на момент написания данной статьи, предусмотрено лишь одно направление подготовки по системе "бакалавр — магистр" с приставкой "нано". Это направление "Электроника и наноэлектроника".

Наноиндустрия для человека

Во всех промышленно развитых странах национальные программы в области нанотехнологий ориентированы далеко не только на научную или военную сферы, а рассматриваются как фактор социально-экономического развития страны применительно к повышению образовательного уровня населения, создания дополнительных рабочих мест высокой квалификации, развития сферы оказания различных социальных услуг населению с использованием новейших материалов и технологий.

В качестве одного из основных факторов планируемого экономического роста директивными документами в различных странах определено качество "человеческого капитала".

Не отрицая важности экономических факторов в формировании эффективной системы предоставления социальных услуг, следует особо выделить возможную роль нанотехнологий в обеспечении фактически государственного заказа на качество "человеческого капитала".

Особенностью данного госзаказа, направленного на инвестиции в человеческий капитал, является:

- огромная емкость рынка социально-ориентированной продукции и услуг, их разнообразие;
- недостаточная насыщенность рынка продукцией наноиндустрии;
- социальная направленность рынка, определяющая его восприятие широкими слоями населения;
- социальная направленность рынка, определяемая возможным участием в нем организаций и предприятий различных форм собственности и численности;
- социальная направленность рынка, инициирующая исполнительные органы власти различных уровней к реализации мероприятий по развитию сферы социальных услуг.

Социально-ориентированная наукоемкая "нано-продукция" может отличаться низкой материалоемкостью, умеренной ценой и доступностью для индивидуального и группового потребления. Реально для России она представляет интерес при решении задач в следующих базовых направлениях:

- **демографическая ситуация** — преодоление тенденции снижения численности населения (в первую очередь, трудоспособного), определяемой сокращением продолжительности жизни, нарастанием бытового и производственного травматизма, низким качеством воды и пищи, экологическим состоянием окружающей среды, катастрофами, терроризмом и низкой рождаемостью (критерием эффективности проводимых мероприятий является рост продолжительности жизни);

- **здравоохранение** — устранение общеизвестного факта отсталости аппаратно-методической базы медицинских услуг, предоставляемых широким слоям населения, и отсутствие эффективной системы профилактики болезней за счет внедрения в практику (в первую очередь, для сельских жителей) новых недорогих (индивидуальных и групповых) приборов и методов мониторинга здоровья населения, санитарно-эпидемиологического надзора и лекарственного обеспечения (критерием эффективности проводимых мероприятий, в первую очередь, является проявление тенденций уменьшения доли медицинской помощи, оказываемой населению в условиях стационаров, и замедление темпов снижения численности населения);
 - **образование** — устранение тенденций к усилению дифференциации в качестве и количестве образовательных услуг, оказываемых различным слоям и территориальным группам населения за счет оснащения образовательных учреждений различных уровней недорогой современной лабораторной базой, необходимой для преподавания фундаментальных дисциплин, как базиса высокого образовательного уровня населения и гибкости при индивидуальной профессиональной ориентации;
 - **культура** — преодоление негативных тенденций по необратимой утрате памятников культуры, музейных, архивных и библиотечных фондов в условиях их старения и увеличения затрат на их реставрацию за счет применения наукоемких нанотехнологий в области восстановления и профилактики культурного наследия;
 - **трудовые отношения** — решение задач по обеспечению современных требований к условиям труда, профилактике профессиональных заболеваний и травматизма за счет применения современных оперативных средств контроля производственных процессов и мониторинга техногенных сред на основе следующего поколения сенсорных систем;
 - **социальная поддержка нетрудоспособных групп населения** — необходимость уменьшения сроков включения в социальную и трудовую среду части трудоспособного населения, находящегося на медицинской реабилитации, или инвалидов за счет широкого использования современных технических средств протезирования и замещения органов, индивидуальной диагностики на дому, вспомогательных средств, облегчающих труд и быт.
- Государственная востребованность и поддержка отечественных нанотехнологий в решении задач обеспечения социальных гарантий населению России позволит:
- стимулировать рост экономики России за счет создания рынка социально-ориентированной конкурентоспособной продукции нового поколения с неограниченным и устойчивым потреблением;
 - повысить качество жизни населения России;
 - гармонизировать систему и уровни социальной поддержки населения России и развитых зарубежных стран;
 - консолидировать гражданское общество и обеспечить поддержку власти.

Научно-технические приоритеты наноиндустрии

При определении научно-технических приоритетов можно использовать следующие критерии:

- сохранение и развитие научного и образовательного потенциалов;
- национальная безопасность и оборона;
- технологическая безопасность и конкурентоспособность;
- социальная потребность;
- экономическая эффективность.

В качестве одного из возможных вариантов развития научно-технической деятельности в области наноиндустрии далее представлен комплекс работ по четырем основным направлениям наноиндустрии (табл. 3), обеспечивающих решение наиболее актуальных задач в области национальной и технологической безопасности государства, обеспечения конкурентоспособности продукции, развития социальной, медицинской и образовательной сфер.

Таблица 3

Актуальные направления работ в области наноиндустрии

Нано-материалы	Нанокмпозиционные материалы с улучшенными механическими свойствами для сверхпрочных, сверхэластичных, сверхлегких конструкций Нанокмпозиционные материалы с особой устойчивостью к экстремальным факторам для термически, химически и радиационно-стойких конструкций Нанокмпозиционные материалы, обладающие "интеллектуальными" свойствами, включая адаптивность и память Нанокмпозиционные и нанодисперсные материалы для высокоэффективной сепарации и избирательного катализа Нанокмпозиции для генерации, преобразования и хранения энергии Нанокмпозиции для электронных, фотонных и флюидных сенсорных, информационно-коммуникационных и исполнительных нано- и микросистем Нанокмпозиционные биосовместимые материалы для выполнения защитных и антисептических функций, протезирования, замещения тканей и органов Биологически активные наночастицы для наноизбирательной биомаркировки, диагностики, фармакотерапии и генной инженерии Специальные нанокмполитные адаптивные материалы с низкой эффективной отражающей или сверхвысокой поглощающей способностью в СВЧ и оптическом диапазонах длин волн Специальные нанодисперсные материалы с максимально эффективным энергопоглощением и энерговыделением, в том числе, импульсным
Нанотехнологии	Машиностроительные технологии для механической, термомеханической и корпускулярной обработки с наноточностью Физико-химические технологии синтеза, атомно-молекулярной химической сборки и самосборки неорганических и органических наноматериалов, биоорганических наноразмерных систем Зондовые, пучковые и корпускулярно-полевые технологии нанослоевого синтеза, наноразмерного нанесения, удаления и модифицирования вещества Биомедицинские технологии наноизбирательной диагностики, фармакотерапии, генной инженерии и сверхлокальной инвазивной хирургии Специальные нанотехнологии для вооружения и военной техники
Нанодиагностика	Высокоразрешающие методы и средства контроля структуры, состава и геометрии наноразмерных объектов и наноматериалов Экспресс-методы и средства регистрации электрических, магнитных, оптических, акустических и других видов полей наноразмерных объектов Методы и средства экспресс-выявления и высокоточного количественного анализа состава нано- и пикоколичеств вещества Высококчувствительные медико-биологические методы и средства анализа наноразмерных объектов в условиях биосред Средства и методы метрологического обеспечения для процессов производства, контроля и исследований наноразмерных объектов, нано- и пикоколичеств вещества Специальные экспресс-методы и средства обнаружения и идентификации нано- и пикоколичеств био- и взрывоопасных веществ
Наносистемы (наноустройства)	Нанохимические компоненты (сорбенты, катализаторы, насосы, реакторы) для высокоэффективной очистки, избирательного сверхскоростного высокопроизводительного синтеза, атомно-молекулярной инженерии Наноэлектронные компоненты (элементная база) для сверхинтегрированных сверхмощных устройств наноэлектроники, сверхскоростных систем генерации, хранения, передачи и обработки информации Нанооптические компоненты (элементная база — излучатели, фотоприемники, преобразователи) для энергетически эффективной светотехники, систем сверхскоростной "сверхплотной" высокопомехозащищенной регистрации, передачи и обработки информации Компоненты нано- и микросистемной техники (электромеханические, оптомеханические, теплофизические, флюидные, биотехнические, биологические) для сверхминиатюрных высококчувствительных сенсорных, сверхточных исполнительных и микроэнергопотребляющих робототехнических устройств Нано- и микроразмерные устройства для генерации, поглощения и аккумуляирования электрической, световой, тепловой и механической энергии Нано- и микроинструмент для процессов атомно-молекулярной инженерии Наносистемы специального назначения для вооружения и военной техники

Реализация представленного перечня фактически базовых научно-технических проектов, по-видимому, не решит всех проблем широкого промышленного развития индустрии наносистем, но обеспечит:

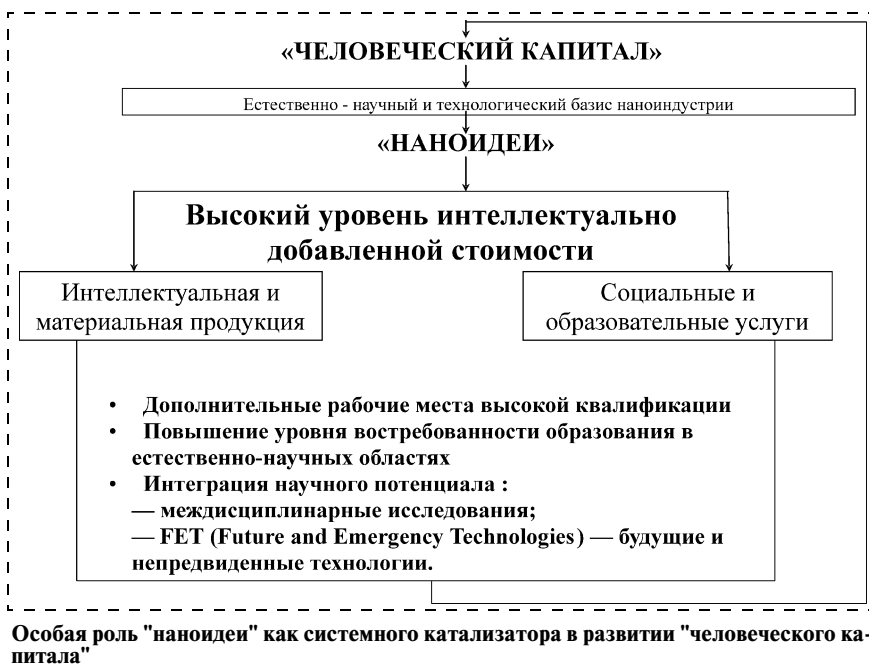
- развитие научного и промышленного потенциалов высоких технологий;
- интенсификацию междисциплинарных исследований и разработок, обеспечивающих научно-технические прорывы по ключевым направлениям научно-технического прогресса;
- развитие кадрового потенциала, интеграцию и эффективное использование высококвалифицированных специалистов;
- развитие сферы экономически эффективных социальных услуг на основе новейших технологий.

Если обратиться к наноиндустрии как к наукоемкой индустрии нового поколения, то любое государство, безусловно, *хочет иметь интегрированный комплекс производственных, научных, образовательных и финансовых организаций различных форм собственности, осуществляющий целенаправленную деятельность по созданию интеллектуальной и наукоемкой продукции с высоким уровнем добавленной стоимости и ранее не достижимыми технико-экономическими показателями*, основанной на высоком потенциале научно-образовательного капитала государства, прогрессивных прорывных и междисциплинарных исследованиях, научно- и экономически обоснованном практическом использовании новых нетрадиционных свойств и функциональных возможностей материалов и систем различной физико-химической природы при переходе к наномасштабам.

С этой целью представляет интерес внедрение в практику создания *нанотехнологических кластеров — как формы кооперации совокупности научных, конструкторских, технологических, производственных, инвестиционных и образовательных организаций, независимо от их организационно-правовых форм, координируемой на государственном и межотраслевом уровнях и основанной на интеграции их целенаправленной деятельности, определяемой получением добавленной стоимости продукции наноиндустрии за счет преимущественного использования результатов интеллектуальной деятельности*.

Заключение

Наноиндустрия — это интегрированный комплекс, включающий: оборудование, материалы, программные средства, систему знаний; технологи-



ческую, метрологическую, информационную, организационно-экономическую культуру и кадровый потенциал, обеспечивающие производство наукоемкой продукции, основанной на использовании новых нетрадиционных свойств материалов и систем при переходе к наномасштабам.

Фундаментальным базисом наноиндустрии являются новые, ранее не известные свойства и функциональные возможности материалов и систем при переходе к наномасштабам, что обусловлено проявлением квантово-размерных, кооперативно-синергетических и, так называемых, "гигантских" эффектов, а также коллективных явлений и процессов, определяемых особенностями процесса переноса и распределения зарядов, энергии, массы и информации при наноструктурировании.

Технологическим базисом наноиндустрии являются система знаний, навыков, умений, аппаратное, метрологическое, информационное обеспечение процессов и операций, направленных на создание наноматериалов и систем с ярко выраженным проявлением свойств, обусловленных наномасштабными факторами.

Наноиндустрия может быть отнесена к наукоемким высокотехнологичным направлениям с высокой добавленной стоимостью, которые опираются в значительной степени на инвестиции в "человеческий капитал".

Основной формой инвестиций в "человеческий капитал" является предоставление образовательных и социальных услуг.

Роль "наноидей" как центра системного катализа для развития научной, технологической, образовательной и социальной составляющих человеческого капитала представлена на рисунке.

О. А. Агеев, Б. Г. Коноплев, В. В. Поляков,
А. М. Светличный, В. А. Смирнов,
Технологический институт Южного федерального
университета, г. Таганрог,
E-mail: sva@fep.tsure.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ФОТОННО-СТИМУЛИРОВАННОЙ ЗОНДОВОЙ НАНОЛИТОГРАФИИ МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОГО АНОДНОГО ОКИСЛЕНИЯ ПЛЕНКИ ТИТАНА

Представлены результаты исследования режимов фотонно-стимулированной зондовой нанолитографии тонкой пленки титана методом локального анодного окисления. Показано, что использование УФ-стимуляции приводит к уменьшению геометрических размеров оксидных наноразмерных структур и сопровождается увеличением порогового напряжения на 1 и 0,5 В при относительной влажности 50 и 90 % соответственно, а также к увеличению порогового значения длительности импульсов напряжения с 50 до 100 мс при относительной влажности 50 %.

Проведенные исследования могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления элементной базы нанoeлектроники.

Введение

Создание элементной базы нанoeлектроники связано с разработкой и исследованием методов модификации поверхности подложки с нанометровым разрешением. Одним из наиболее эффективных методов формирования элементной базы нанoeлектроники является нанолитография методом локального анодного окисления (ЛАО) с использованием сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) [1]. Этот метод зондовой нанолитографии также позволяет формировать диэлектрические барьеры, резистивные маски для селективного травления, шаблоны, которые могут быть использованы при формировании элементов нанoeлектроники (квантовых точек, нанопроводников, одноэлектронных транзисторов и др.) [1–3].

При проведении ЛАО воздействие на поверхность осуществляется путем подачи импульсов напряжения к системе проводящий зонд—подложка. При этом в жидкостном мениске, образующемся под острием зонда и основу которого составляет адсорбированная на поверхности подложки вода, протекает электрохимическая реакция, сопровождающаяся процессами электро- и массопереноса ионизированных атомов подложки и гидроксильных групп с образованием оксидов и водорода [3].

Установлено, что на кинетику процесса ЛАО оказывают влияние толщина и химический состав пленки адсорбата, определяемые относительной влажностью среды в технологической камере, а также длительность импульсов напряжения, прикладываемого к зонду, и напряженность электрического

поля, которая зависит от амплитуды импульса напряжения и расстояния зонд—подложка [1–3].

Проведенные ранее исследования показали, что фотонная стимуляция оказывает дополнительное активирующее воздействие на процесс ЛАО, что может быть использовано для повышения воспроизводимости и однородности геометрических параметров формируемых элементов металлической нанoeлектроники [4, 5].

Целью работы является исследование режимов нанолитографии пленки титана методом ЛАО с использованием стимуляции некогерентным УФ- и ИК-излучением.

Методика эксперимента

Экспериментальные исследования режимов ЛАО проводились с использованием СЗМ Solver P47 PRO (производитель — ЗАО "Нанотехнология — МДТ", г. Зеленоград). Относительная влажность воздуха контролировалась с помощью цифрового измерителя влажности Oregon Scientific ETHG913R и составляла 50, 70 и 90 %. Векторная нанолитография выполнялась в динамическом режиме атомно-силовой микроскопии (АСМ), с использованием поставляемого в комплекте с оборудованием пакета прикладных программ Nova RC1 (1.0.26.1055). В условиях нанолитографии в динамическом режиме АСМ интенсивность взаимодействия зонда с поверхностью подложки обратно пропорциональна току цепи обратной связи системы управления сканирующего зондового микроскопа (в программе Nova RC1 — параметр Set Point). В случае использования кремниевых кантилеверов марки NSG10 с проводящим W_2C покрытием при приложении импульсов напряжения амплитудой от 5 до 10 В, длительностью 100 мс и скоростью сканирования 1 мкм/с на поверхности тонкой пленки титана формировались матрицы регулярных оксидных наноразмерных структур в виде точек (рис. 1).

Для изучения воздействия УФ- и ИК-стимуляции на кинетику локального анодного окисления область, в которой проводилось ЛАО, облучали УФ-светодиодом (CREE, USA) и ИК-светодиодом (АЛ-103А), максимальные значения интенсивности излучения которых соответствовали длинам волн 395 и 900 нм.

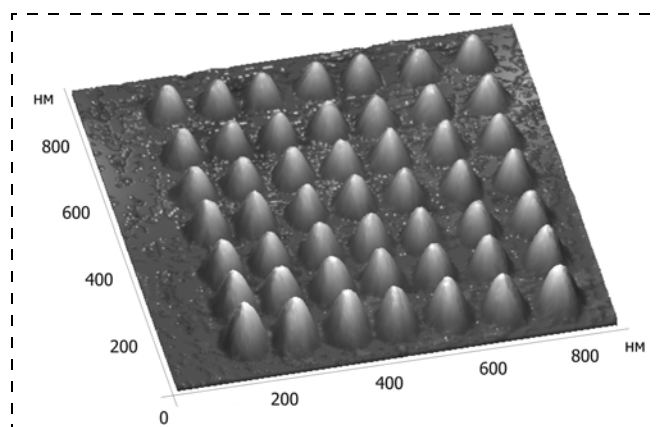


Рис. 1. АСМ-изображение оксидных наноразмерных структур на поверхности пленки титана, сформированных зондовой нанолитографией методом ЛАО

Исследование влияния длительности импульсов напряжения на геометрические параметры формируемых оксидных наноразмерных структур проводилось путем подачи импульсов напряжения амплитудой 10 В с длительностью от 10 до 1000 мс при трех значениях относительной влажности (50, 70 и 90 %) как при стимуляции УФ- и ИК-излучением, так и без нее. Ток цепи обратной связи системы управления СЗМ (параметр SetPoint) составлял 0,5 нА, скорость сканирования — 1,5 мкм/с.

Статистическую обработку полученных АСМ-изображений проводили с использованием программного пакета Image Analysis 2.0 (производитель — ЗАО "Нанотехнология — МДТ", г. Зеленоград).

Результаты и их обсуждение

По полученным статистическим данным построены зависимости средних значений высоты и диаметра оксидных наноразмерных структур от амплитуды импульса напряжения, приложенного к системе зонд—подложка, при различных значениях влажности и тока цепи обратной связи системы управления СЗМ, часть которых представлены на рис. 2—4.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при увеличении тока цепи обратной связи системы управления СЗМ уменьшаются геометрические размеры оксидных наноразмерных структур. Возможной причиной этого эффекта является уменьшение латеральных размеров водного мениска между зондом и поверхностью подложки в результате увеличения расстояния зонд—подложка. Подобная тенденция изменения геометрических размеров оксидных наноразмерных структур также демонстрировалась в работе [6].

Установлено, что стимуляция УФ- и ИК-излучением оказывает подавляющее воздействие на процесс ЛАО пленки, в результате чего происходит уменьшение высоты и диаметра оксидных наноразмерных структур. Из полученных экспериментальных данных также следует, что УФ-стимуляция процесса ЛАО пленки титана приводит к увеличению значения

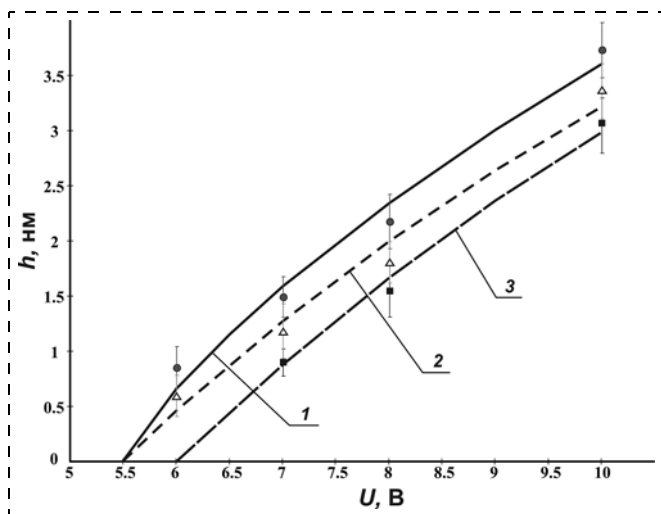


Рис. 2. Зависимость высоты оксидных наноразмерных структур титана от приложенного напряжения при относительной влажности 90 % и SetPoint = 0,1 нА:

1 — без стимуляции; 2 — ИК-стимуляция; 3 — УФ-стимуляция

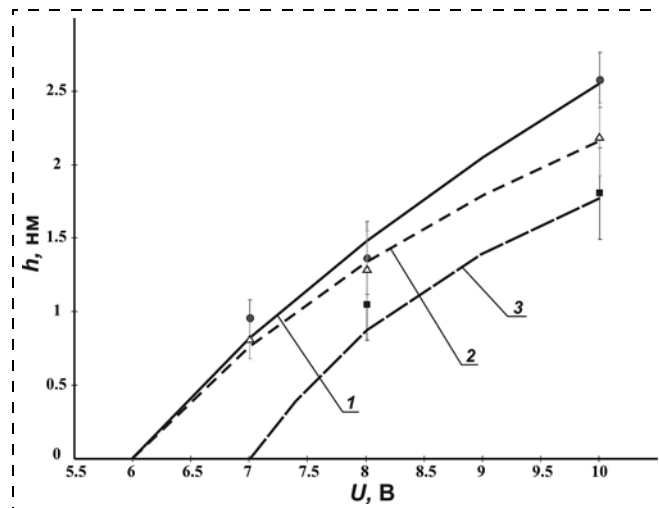


Рис. 3. Зависимость высоты оксидных наноразмерных структур титана от приложенного напряжения при относительной влажности 50 % и SetPoint = 0,3 нА:

1 — без стимуляции; 2 — ИК-стимуляция; 3 — УФ-стимуляция

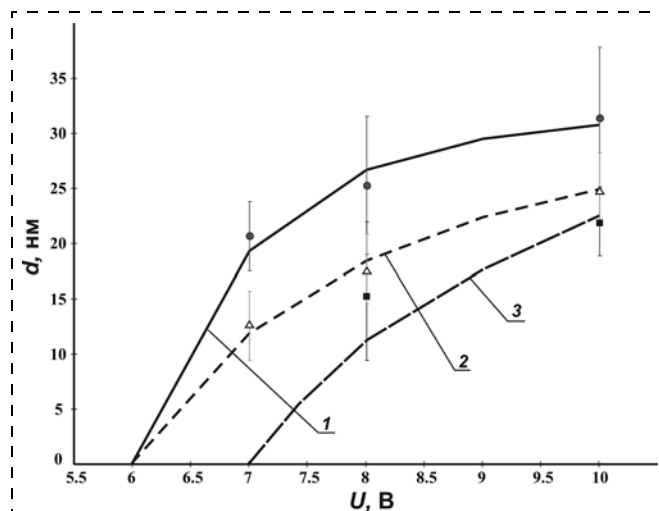


Рис. 4. Зависимость диаметра оксидных наноразмерных структур титана от приложенного напряжения при относительной влажности 50 % и SetPoint = 0,3 нА:

1 — без стимуляции; 2 — ИК-стимуляция; 3 — УФ-стимуляция

порогового напряжения с 5,5 до 6 В при относительной влажности 90 % (см. рис. 2) и с 6 до 7 В при относительной влажности 50 % (см. рис. 3, 4).

В результате статистической обработки АСМ-изображений были получены зависимости высоты оксидных наноразмерных структур от длительности импульса приложенного напряжения (рис. 5). Из полученных зависимостей следует, что высота оксидных наноразмерных структур, сформированных при УФ- и ИК-стимуляции, меньше, чем при проведении ЛАО без стимуляции, что подтверждает представленные ранее результаты (см. рис. 2—4).

Из приведенных данных также следует, что при относительной влажности 50 % УФ-стимуляция увеличивает пороговое значение длительности импульсов напряжения с 50 до 100 мс. Более слабое влияние УФ-стимуляции на пороговую длительность импульсов напряжения также наблюдалась при относительной влажности 70 и 90 %.

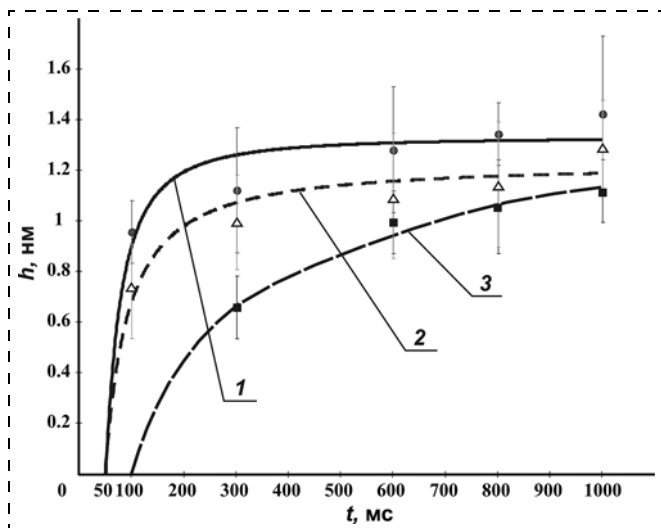


Рис. 5. Зависимость высоты оксидных наноразмерных структур титана от длительности импульсов напряжения при относительной влажности 50 % и SetPoint = 0,5 нА:

1 — без стимуляции; 2 — ИК-стимуляция; 3 — УФ-стимуляция

Возможным механизмом влияния фотонной стимуляции на геометрические размеры оксидных наноразмерных структур, а также пороговые значения амплитуды и длительности импульсов напряжения являются изменение плотности и перераспределение поверхностного заряда, приводящее к изменению поверхностного потенциала и удельного сопротивления пленки титана, а также уменьшению характерного диаметра области, в которой протекают основные процессы токо- и массопереноса при ЛАО.

Заключение

В результате проведенной работы исследованы режимы фотонно-стимулированного ЛАО пленки тита-

на, получены зависимости геометрических размеров оксидных наноразмерных структур от амплитуды и длительности импульсов напряжения, приложенного к системе зонд—подложка. Установлено, что использование УФ-стимуляции приводит к уменьшению геометрических размеров оксидных наноразмерных структур в сочетании с увеличением порогового напряжения. Полученные результаты показывают, что влияние стимуляции УФ-излучением на увеличение порогового значения длительности импульсов напряжения, приложенного к системе зонд—подложка, возрастает при уменьшении относительной влажности. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов формирования элементной базы нанoeлектроники. Однако для оптимизации технологических режимов необходимо проведение дальнейших исследований выявленных эффектов с использованием источников излучения различной мощности в широком спектральном диапазоне.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 06-07-81000-Бе_а)

Список литературы

1. Чаплыгин Ю. А. Нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2005. 448 с.
2. Мальцев П. П. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
3. Garcia R., Ramses V. Nano-chemistry and scanning probe nanolithographies // Chem. Soc. Rev. 2006. 35. P. 29—38.
4. Сеченов Д. А., Светличный А. М., Поляков В. В. Фотостимулированные технологические процессы в кремниевых структурах. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. 103 с.
5. Агеев О. А., Светличный А. М., Смирнов В. А. и др. Формирование наноразмерных структур в пленке титана методом фотонно-стимулированного локального анодного окисления // Мат. IV междунар. науч. конф. "Молодые ученые-2006", г. Москва. 2006. Т. 2. С. 219—222.
6. Асеев А. Л. Атомная структура полупроводниковых систем. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 292 с.

УДК 681.586.6

А. Г. Козлов,

канд. техн. наук, доц., Омский филиал Института физики полупроводников СО РАН, г. Омск

ТЕПЛОВЫЕ МИКРОСЕНСОРЫ: КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Проведен анализ конструктивного исполнения тепловых микросенсоров. Рассмотрена иерархия механических, электрических и тепловых связей в типичной конструкции теплового микросенсора. Для каждой группы тепловых микросенсоров проанализированы общие конструктивные особенности. Рассмотрены особенности конструкции отдельных элементов тепловых микросенсоров: оснований; термически изолированных структур; теплогенерирующих элементов; термочувствительных элементов; теплопередающих элементов; элементов, обеспечивающих передачу электрических сигналов; других специальных элементов. Обсуждаются вопросы объединения функций элементов и отсутствия некоторых базовых элементов в конструкции тепловых микросенсоров.

Введение

Тепловые микросенсоры составляют значительную группу микросенсоров и служат для измерения большого ряда параметров [1—5]. В первой статье [6], посвященной тепловым микросенсорам, была представлена их классификация, в основу которой положена роль тепловых процессов при функционировании данных микросенсоров. В соответствии с этой ролью все тепловые микросенсоры разделены на следующие группы: микросенсоры прямого преобразования; микросенсоры с промежуточным тепловым преобразованием; микросенсоры с управляемыми тепловыми потоками; микросенсоры с температурной активацией и управлением; комбинированные микросенсоры. Для каждой группы тепловых микросенсоров была также разработана обобщенная функциональная схема с использованием подхода на основе распределенных систем. Данные функциональные схемы позволили выделить в структуре тепловых микросенсоров основные функциональные

элементы и связи между ними и определить отличительные признаки каждой группы тепловых микросенсоров.

Особенности функционирования тепловых микросенсоров, главной из которых является использование тепловых процессов при преобразовании измеряемой величины в выходной сигнал, предъявляют определенные требования к их конструкции. Учет данных требований приводит к конструктивным отличиям тепловых микросенсоров от других типов микросенсоров. В связи с накоплением большого объема информации по практическим конструкциям тепловых микросенсоров данный материал требует систематизации и обобщения.

Целью статьи является рассмотрение общих конструктивных особенностей каждой группы тепловых микросенсоров, а также рассмотрение существующих конструкций отдельных элементов тепловых микросенсоров, которые являются составными частями каждого теплового микросенсора. Данная статья является продолжением темы работы [6]. Опираясь на результаты этой работы (классификация тепловых микросенсоров, функциональные схемы для выделенных групп тепловых микросенсоров), проводится рассмотрение конструктивных особенностей тепловых микросенсоров.

Основные конструкции тепловых микросенсоров

Конструктивно любой тепловой микросенсор состоит из набора элементов, которые обеспечивают выполнение заданной функции преобразования измеряемой величины в выходной сигнал сенсора, чаще всего электрической природы. Особенностью тепловых микросенсоров, отличающей их от объемных тепловых сенсоров, является то, что все элементы теплового микросенсора представляют собой комбинацию различных пленочных слоев или (и) комбинацию полупроводниковых слоев с различным типом проводимости. Все элементы теплового микросенсора находятся в определенных иерархических связях. Для большинства тепловых микросенсоров иерархия связей может быть представлена следующей схемой, изображенной на рис. 1. Как видно из представленной схемы, все тепловые процессы в микросенсоре протекают в термически изолированной структуре и элементах, связанных с этой структурой. Вместе с тем, механически термически изолированная структура крепится к основанию, и эта механическая связь влияет на тепловые процессы в самой структуре. Кроме того, на тепловые процессы влияет окружающая среда, как непосредственно через прямой теплообмен между термически изолированной структурой и этой средой, так и посредством теплообмена с основанием теплового микросенсора. Все количество теплоты, выделившееся в теплогенерирующем элементе, рассеивается через термически изолированную структуру в окружающую среду. Таким образом, основной отличительной особенностью тепловых микросенсоров является наличие термически изолированной структуры, свойства которой и расположенных на ней элементов определяют основные тепловые характеристики данных микросенсоров.

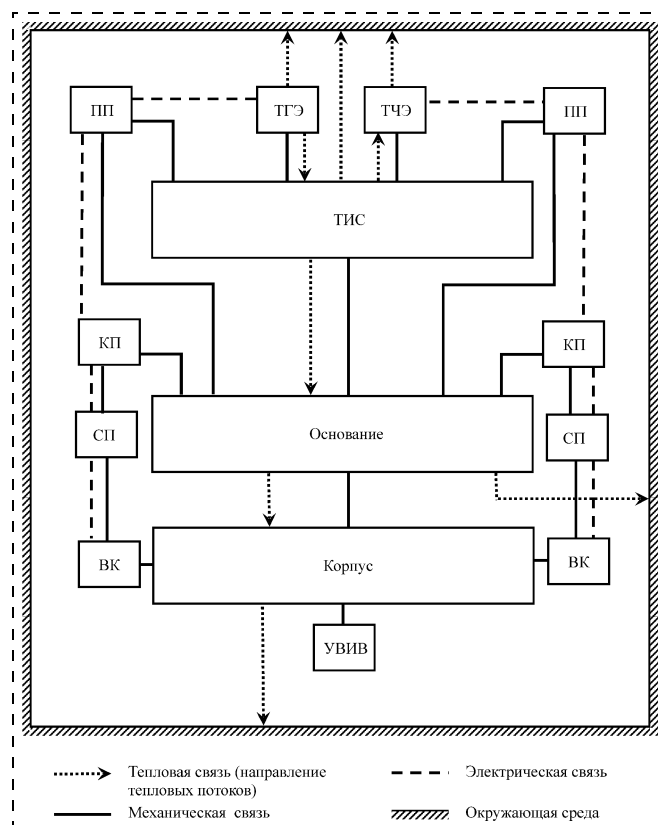


Рис. 1. Иерархия связей в тепловом микросенсоре:

ТГЭ — теплогенерирующий элемент; ТЧЭ — термочувствительный элемент; ПП — пленочные проводники; КП — контактные площадки; СП — соединительные проводники; ВК — выводы корпуса; УВИВ — узел ввода измеряемой величины

Конструкция теплового микросенсора в значительной мере определяется типом данного сенсора. В работе [6] была предложена классификация тепловых микросенсоров исходя из роли тепловых процессов при их функционировании. В таблице представлены конструктивные особенности каждой группы тепловых микросенсоров в соответствии с указанной классификацией. Приведенные данные характеризуют конструкции каждой группы тепловых микросенсоров исходя из наличия и особенностей конструкции основных элементов микросенсоров: термически изолированной структуры, теплогенерирующего и термочувствительного элементов.

Важным фактором, определяющим конструкцию теплового микросенсора, является технология изготовления термически изолированной структуры. По конструктивно-технологическим особенностям термически изолированных структур все тепловые микросенсоры можно разделить на две большие группы: 1) тепловые микросенсоры, у которых термически изолированная структура получена путем травления основания (рис. 2); 2) тепловые микросенсоры, у которых термически изолированная структура получена путем травления жертвенного слоя (рис. 3).

Главное конструктивное отличие между указанными группами заключается в расстоянии между нижней поверхностью термически изолированной структуры и основанием. У тепловых микросенсо-

Конструктивные особенности различных групп тепловых микросенсоров

Группа тепловых микросенсоров	Элементы теплового микросенсора			Максимальная рабочая температура	Примечание
	Термически изолированная структура	Теплогенерирующий элемент	Термочувствительный элемент		
Группа 1. Тепловые микросенсоры прямого преобразования	Конструкция зависит от использования. Часто используются консольные термически изолированные структуры	Внешний источник теплового сигнала	Терморезистивный элемент Термоэлектрический элемент Термочувствительный элемент на основе <i>p-n</i> -перехода Пирозлектрический элемент	1000 °C 600 °C Кремний — 120 °C 200 °C	
Группа 2. Тепловые микросенсоры с промежуточным тепловым преобразованием	Консольные, мостовые, мембранные термически изолированные структуры. При использовании болометров и биметаллических элементов — термически изолированные структуры в виде подвешенных плат	Поглощающий слой (тепловые приемники излучения и преобразователи оптического сигнала). Пленочный резистивный нагреватель (электротепловые преобразователи)	Термоэлектрический элемент. Терморезистивный элемент (болометр). Пиротехнический элемент. Термочувствительный элемент на основе <i>p-n</i> -перехода. Биметаллический чувствительный элемент	В основном не превышает 100 °C	
Группа 3. Тепловые микросенсоры с управляемыми потоками теплоты	Консольные, мостовые, мембранные термически изолированные структуры. В ряде конструкций — отсутствие термически изолированных структур	Пленочный резистивный нагреватель	Терморезистивный элемент. Термоэлектрический элемент. Термочувствительный элемент на основе <i>p-n</i> -перехода	В основном не превышает 100 °C. Для газовых кондуктометрических микросенсоров может достигать 200 °C	Возможно совмещение функций: пленочный резистивный нагреватель — терморезистивный элемент
Группа 4. Тепловые микросенсоры с температурной активацией и управлением	Микросенсоры, работающие при высоких температурах — термически изолированные структуры в виде подвешенных плат. Редко — мембранные термически изолированные структуры	Пленочный резистивный нагреватель	В основном не используется. Терморезистивный элемент (используется редко)	До 500 °C (газовые микросенсоры на основе полупроводниковых оксидных материалов). До 1000 °C (газовые микросенсоры на основе твердых электролитов)	Содержат основной чувствительный элемент, выполняющий функцию преобразования измеряемой величины в выходной сигнал микросенсора
Группа 5. Тепловые микросенсоры, использующие несколько тепловых эффектов (термокаталитические газовые микросенсоры)	Термически изолированные структуры в виде подвешенных плат. Редко — мембранные термически изолированные структуры	Два теплогенерирующих элемента: пленочный резистивный нагреватель; каталитический слой	Терморезистивный элемент. Термоэлектрический элемент (используется значительно реже)	400—600 °C	Часто совмещение функций (пеллистор): пленочный резистивный нагреватель — терморезистивный элемент

ров группы 2 это расстояние не превышает единиц микрометров, тогда как у тепловых микросенсоров группы 1 оно может составлять десятки и сотни микрометров.

Конструктивные особенности тепловых микросенсоров проявляются также в расположении элементов на термически изолированной структуре. Тепловые микросенсоры по этому параметру могут быть квалифицированы следующим образом:

1) тепловые микросенсоры с вертикальным расположением элементов на одной стороне термически изолированной структуры (на рис. 4, *а* представлен газовый микросенсор на основе оксидного полупроводникового материала);

2) тепловые микросенсоры с вертикальным расположением элементов на двух сторонах термически

изолированной структуры (на рис. 4, *б* представлен электротепловой преобразователь);

3) тепловые микросенсоры с горизонтальным расположением элементов на одной (верхней) стороне термически изолированной структуры (на рис. 4, *в* представлен электротепловой преобразователь).

Конструктивно и технологически наиболее простыми являются тепловые микросенсоры с горизонтальным расположением элементов. В большинстве случаев в них не требуется использования и, следовательно, изготовления изолирующих слоев между элементами. При изготовлении теплогенерирующего и термочувствительного элементов из одного материала (платина, кремний) возможно сокращение числа технологических операций. Однако в

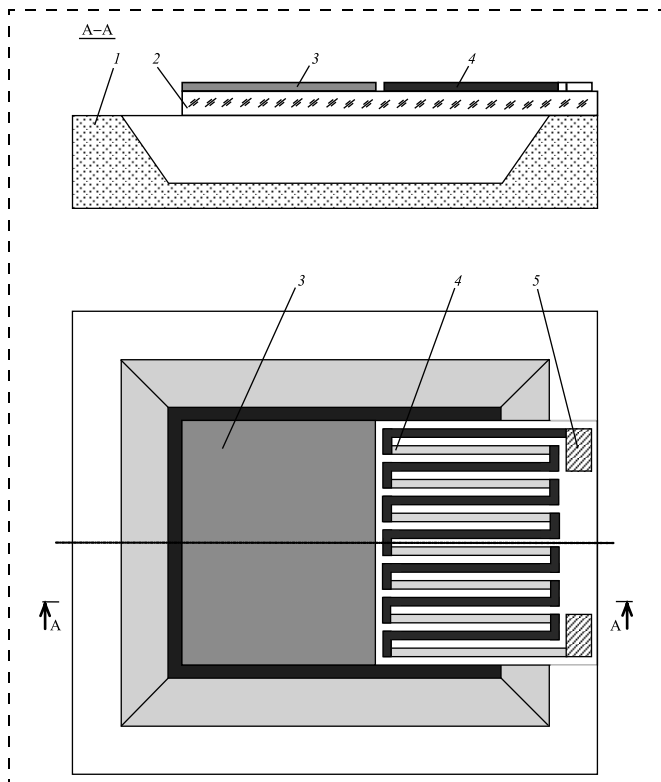


Рис. 2. Термоэлектрический приемник излучения консольного типа, изготовленный путем анизотропного травления кремния:

1 — основание; 2 — термически изолированная структура; 3 — теплогенерирующий элемент — поглощающий слой; 4 — термочувствительный элемент — термоэлектрический преобразователь; 5 — контактные площадки

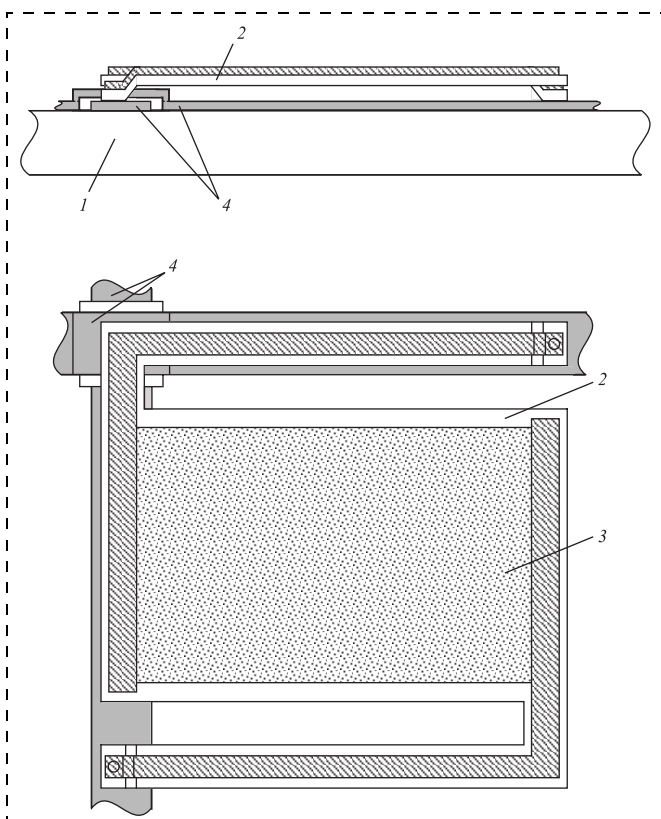


Рис. 3. Микроболометр, изготовленный путем травления жертвенного слоя:

1 — основание; 2 — термически изолированная структура; 3 — микроболометр; 4 — шины считывания

этом варианте конструкции тепловое сопротивление между теплогенерирующим и термочувствительным элементами более высокое, чем в остальных двух вариантах. Поэтому для получения высоких быстродействия, чувствительности или рабочей температуры при снижении потребляемой мощности (микросенсоры с температурной активацией) следует выбирать конструктивные варианты тепловых микросенсоров с вертикальным расположением элементов.

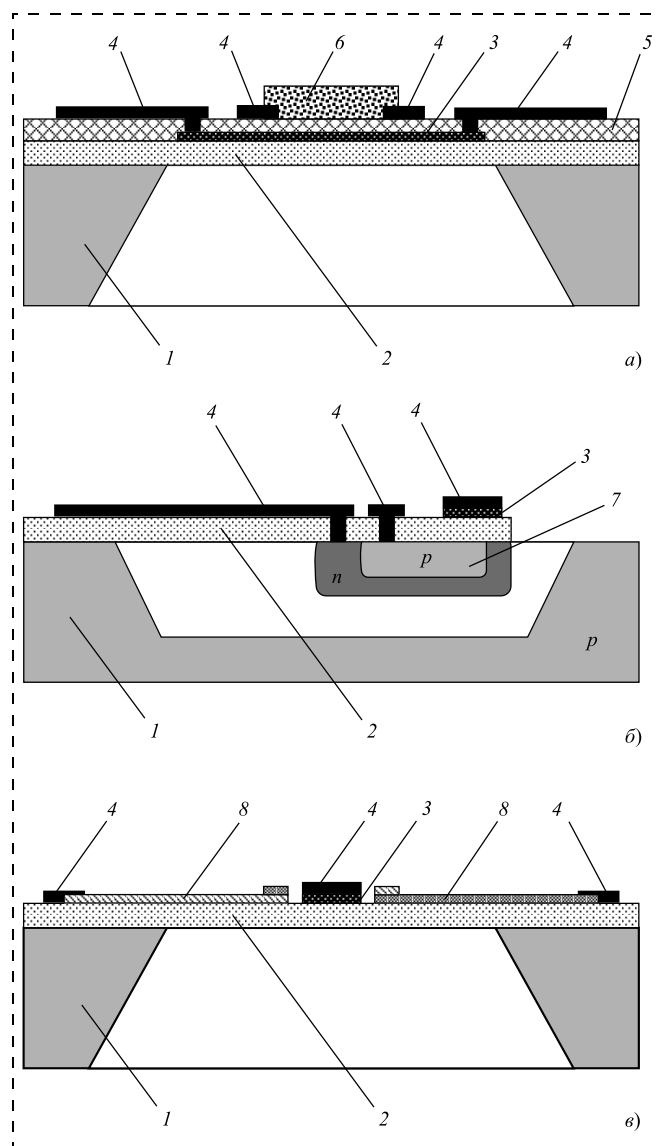


Рис. 4. Варианты расположения элементов на термически изолированной структуре:

a — тепловой микросенсор с вертикальным расположением элементов на одной стороне термически изолированной структуры; *б* — тепловой микросенсор с вертикальным расположением элементов на двух сторонах термически изолированной структуры; *в* — тепловые микросенсоры с горизонтальным расположением элементов на одной (верхней) стороне термически изолированной структуры; 1 — основание; 2 — термически изолированная структура; 3 — теплогенерирующий элемент; 4 — пленочные проводники и контактные площадки; 5 — изолирующий слой; 6 — газочувствительный резистивный слой; 7 — термочувствительный элемент на основе p - n -перехода; 8 — батарея пленочных термопар

Особенности конструкции отдельных элементов

Элементы, используемые в конструкции тепловых микросенсоров, можно разделить на следующие группы:

- основания;
- термически изолированные структуры;
- теплогенерирующие элементы;
- термочувствительные элементы;
- элементы, обеспечивающие передачу электрических сигналов;
- другие специальные элементы.

Внутри каждой группы элементов существует их разделение на различные подгруппы, исходя из физических принципов, используемых при функционировании элементов, применяемых конструкций, технологий изготовления и материалов. В связи с этим следует подробно рассмотреть особенности конструкций отдельных групп элементов.

Основания. Основание в конструкции теплового микросенсора выполняет несколько функций:

- 1) служит основой для крепления термически изолированной структуры, т. е. является основанием для термически изолированной структуры, обеспечивая ее механическую устойчивость;
- 2) является несущей конструкцией, которая обеспечивает крепление теплового микросенсора в корпус, а при использовании в бескорпусном варианте — крепление микросенсора на исследуемом объекте;
- 3) является тепловым стоком для генерируемой в структуре теплового микросенсора теплоты; в этой связи необходимо иметь как можно большую теплопроводность и теплоемкость, чтобы обеспечивать постоянное значение своей температуры и, следовательно, точность преобразования теплового микросенсора;
- 4) является несущим элементом, на котором располагаются контактные площадки, служащие для присоединения выводов корпуса (вариант использования микросенсора в корпусе) или внешних выводов (бескорпусной вариант) к тепловому микросенсору.

Выбор материала и конструкции основания теплового микросенсора определяется конструктивно-технологическими особенностями используемой термически изолированной структуры. В тепловых микросенсорах с термически изолированными структурами, полученными путем травления основания, в качестве материала основания применяют монокристаллический кремний [2, 4, 5] или, крайне редко, оксид алюминия [7] и арсенид галлия [8]. После травления форма основания изменяется. В месте расположения термически изолированной структуры в основании формируется либо углубление, над которым расположена термически изолированная структура (см. рис. 4, б), либо сквозное отверстие до термически изолированной структуры (см. рис. 4, а и в). Форма углубления или отверстия зависит от материала и кристаллографии основания и характеристики процесса травления. Например, при анизотропном травлении кремния формируются профилированные углубления или отверстия. В качестве

основания при анизотропном травлении кремния в основном используются пластины кремния кристаллографической ориентации (100). Применение в качестве основания для тепловых микросенсоров кремния кристаллографической ориентации (111) рассмотрено в работе [9].

При получении термически изолированных структур путем травления жертвенного слоя в качестве основания чаще всего используются полупроводниковые или металлические подложки с нанесенным изолирующим слоем (например, монокристаллический кремний с изолирующим слоем диоксида кремния [10]). Форма основания в этом случае остается неизменной. Возможно также использование диэлектрических подложек (ситалл, кварцевое стекло, керамика). Однако они имеют низкий коэффициент теплопроводности, что затрудняет выполнение ими функции теплового стока.

Термически изолированные структуры. Термически изолированная структура служит для размещения других элементов тепловых микросенсоров (т. е. выполняет роль подложки), обеспечивает передачу теплоты между элементами сенсора и тепловую развязку с окружающей средой и основанием сенсора. Она состоит из одного или нескольких тонких слоев толщиной от десятых долей до единиц микрометров и может быть разделена на активную область, в которой размещены основные элементы теплового микросенсора, и специальные элементы крепления, служащие для закрепления активной области на основании теплового микросенсора. Элементы крепления используются также для размещения пленочных электрических выводов от элементов сенсора к контактным площадкам, расположенным на основании. Кроме того, элементы крепления с расположенными на них выводами должны обеспечивать тепловую развязку между активной областью и основанием сенсора. В качестве элементов крепления используются специальные балочные пленочные мосты. В некоторых типах термически изолированных структур активная область присоединяется к основанию теплового сенсора непосредственно по своему контуру. Активная область термически изолированной структуры в основном имеет прямоугольную форму. В большинстве тепловых микросенсоров длина и ширина активной области и элементов крепления термически изолированной структуры гораздо больше, чем их толщина. Эта особенность, а также изготовление слоев термически изолированной структуры из материалов с низким коэффициентом теплопроводности обеспечивают хорошую тепловую развязку между активной областью структуры и окружающей средой.

В зависимости от формы и места крепления термически изолированные структуры подразделяются на следующие типы (рис. 5):

1) консоли [1, 5, 11, 12]; прямоугольная активная область непосредственно крепится к основанию с одной своей стороны;

2) мосты (двухплечий, трехплечий, четырехплечий) [13—18]; активная область прямоугольной или сложной формы непосредственно крепится к основанию с двух своих сторон; в дополнение к этому в

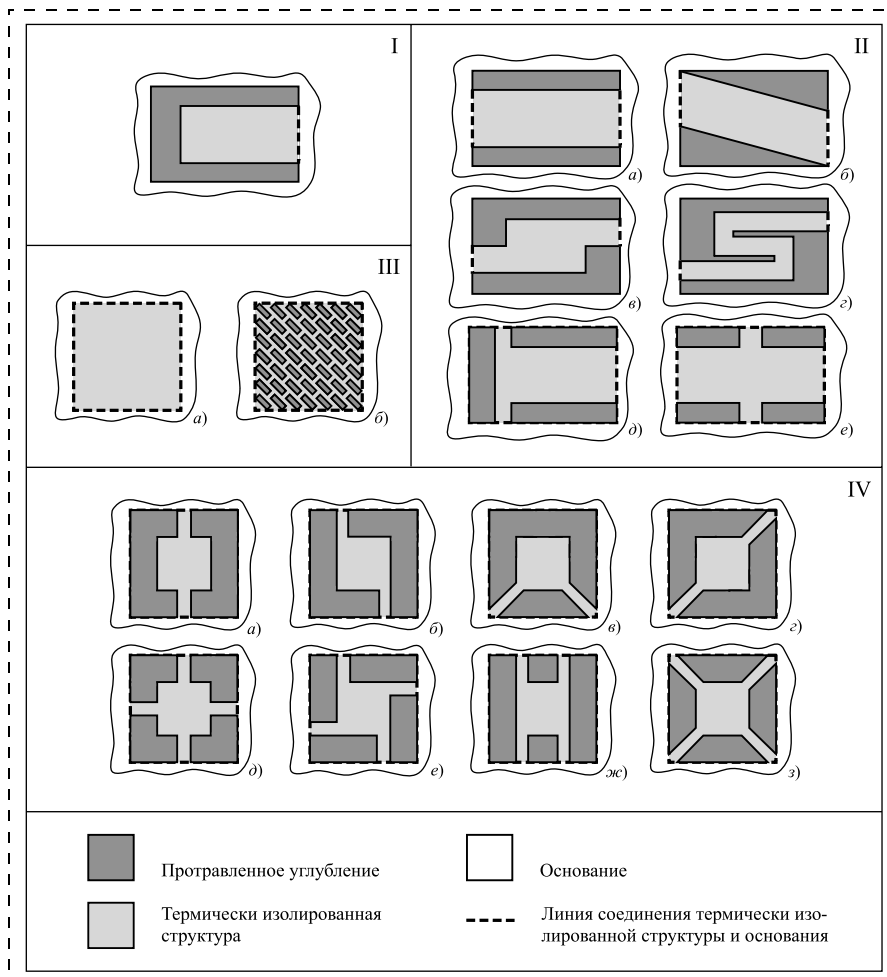


Рис. 5. Термически изолированные структуры, изготавливаемые путем анизотропного травления кремния:

I — консольная структура; II — мостовые структуры; III — мембранные структуры; IV — платы, подвешенные с помощью консольных мостов

трехплечем и четырехплечем мостах для крепления используются специальные элементы;

3) мембраны (закрытые мембраны [19–26], сетчатые мембраны [27]); прямоугольная активная область непосредственно крепится к основанию с четырех своих сторон по всему контуру;

4) подвешенные платы, или другое название — плавающие мембраны [9, 12, 28–38]; активная область крепится к основанию с помощью специальных элементов (балочные консольные мосты);

5) сложные термически изолированные структуры (структура в виде прямоугольной спирали [39]; рамочная структура [40]; шестиугольная подвешенная плата [41]); данные структуры имеют сложную форму активной области или элементов крепления; используются редко.

Материал и композиция пленочных слоев в термически изолированной структуре и их толщина определяют рядом конструктивных и технологических требований. Среди конструктивных требований ключевыми являются минимум рассеяния теплоты за счет теплопроводности через термически изолированную структуру и механическая прочность и устойчивость. Для уменьшения рассеяния теплоты термически изолированная структура долж-

на быть как можно тоньше и изготавливаться из материалов, имеющих малый коэффициент теплопроводности. Для обеспечения механической прочности и устойчивости толщина термически изолированной структуры должна увеличиваться, а ее материалы должны иметь высокое значение модуля упругости. Кроме того, остаточные механические напряжения в термически изолированной структуре должны быть сведены к минимуму. Это условие сложно соблюдать, когда мембрана изготавливается из одного материала. Например, широко используемые в термически изолированных структурах слои диоксида кремния имеют остаточные напряжения сжатия, тогда как слои нитрида кремния характеризуются остаточными напряжениями растяжения. Комбинацией слоев оксида и нитрида кремния и выбором их толщин можно минимизировать остаточные напряжения в термически изолированной структуре [42].

Важным фактором, влияющим на механическую прочность и устойчивость термически изолированной структуры, является рабочая температура теплового микросенсора. При больших значениях рабочей температуры в термически изолированной структуре могут возникать значительные термомеханические напряжения, причиной их является различие в коэффициентах тепло-

вого расширения как слоев термически изолированной структуры, так и пленочных слоев, из которых изготовлены другие элементы теплового микросенсора. Особенно это характерно для тепловых микросенсоров, работающих при высоких температурах. Остаточные и термомеханические напряжения могут приводить к изменению формы термически изолированной структуры, ее изгибу или скручиванию.

В настоящее время в тепловых микросенсорах используются термически изолированные структуры со следующими слоями: SiO_2 [17, 28, 38, 43, 44]; Si_3N_4 [9, 15, 17, 21, 26, 33, 37, 45–49]; Al_2O_3 [7]; пористый кремний/ SiO_2 [50–53]; Si/SiO_2 [22, 54–56]; $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ [19, 23, 42, 57]; $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ [21, 58]; $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ [59]; $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}/\text{SiO}_2$ [20]; SiC/SiO_2 [60].

Теплогенерирующие элементы. Теплогенерирующие элементы являются источниками теплоты в тепловых микросенсорах. В качестве теплогенерирующих элементов применяются резистивные нагреватели, поглощающие или каталитические пленочные слои.

Резистивные нагреватели используются в качестве преобразователей электрического сигнала в тепловой сигнал в электротепловых преобразователях (группа 2 тепловых сенсоров), в качестве постоянных источников теплоты в тепловых микросенсорах

с управляемыми тепловыми потоками (группа 3), в качестве нагревателей в микросенсорах с температурной активацией и в качестве управляемых нагревателей в микросенсорах с температурным управлением (группы 4 и 5). В тепловых микросенсорах в качестве резистивных нагревателей обычно используются тонкопленочные резисторы [14, 17, 20, 21, 26, 31, 35, 42, 45, 56, 58, 61–63], диффузионные резисторы [64] и МОП-транзисторы [65]. В тепловых микросенсорах, работающих при температурах до 100 °С, конструкции нагревателей и используемые материалы для них не отличаются от конструкции и используемых материалов для тонкопленочных и диффузионных резисторов, применяемых в микросенсорах. В тепловых микросенсорах, работающих при температурах более 200 °С, в качестве нагревателей используются тонкопленочные резисторы, у которых резистивные слои изготавливают из материалов, обеспечивающих стойкость и стабильность при высоких температурах. К данным материалам относятся платина [20, 21, 26, 56, 58, 61], поликремний [14, 17, 31, 35, 42, 44, 61, 62]. Они являются наиболее применяемыми в качестве материалов резистивных слоев тонкопленочных нагревателей в тепловых микросенсорах. Кроме них используется также никром [58, 63]. Тонкопленочные нагреватели в тепловых микросенсорах в основном имеют прямоугольную форму или форму типа "меандр". В электротепловых преобразователях одним из основных требований к резистивным нагревателям является малые значения паразитной индуктивности и паразитной емкости между нагревателем и термочувствительным элементом. Это позволяет повысить верхнюю частоту входного сигнала преобразователя. Чтобы удовлетворить данному требованию, нагреватели в электротепловых преобразователях выполняют в виде бифилярных пленочных резисторов [58].

Поглощающие пленочные слои используются для преобразования энергии излучения в тепловую энергию в тепловых приемниках излучения, болометрах и преобразователях ИК-излучения в видимое излучение с механическим смещением (группа 2). Основными требованиями к конструкции поглощающих слоев, которые позволяют повысить чувствительность указанных микросенсоров, являются обеспечение высокого коэффициента поглощения (коэффициента черноты) и наименьшей возможной толщины слоев. Коэффициент поглощения влияет на эффективность преобразования энергии излучения в тепловую энергию, а толщина поглощающего слоя определяет распределение температуры в термически изолированной структуре и постоянную времени теплового микросенсора. В свою очередь, коэффициент поглощения имеет обратную зависимость от толщины при малых толщинах поглощающего слоя. Поэтому при конструировании тепловых микросенсоров с поглощающими пленочными слоями в качестве теплогенерирующих элементов основное внимание уделяется выбору материала и толщины поглощающего слоя. В качестве поглощающих слоев в тепловых микросенсорах используются пленочные слои из платиновой [66, 67], золотой [39, 66] или серебряной [66] черни, получаемые спе-

циальными методами вакуумного напыления. Кроме классической конструкции в качестве поглощающих слоев в тепловых микросенсорах применяются:

- сверхтонкие слои металлов, которые имеют высокий коэффициент поглощения при определенной толщине — слой золота толщиной 17 нм [66], слой никеля толщиной 10 нм [23];
- многослойные структуры — титан — полиимид — никром [29]; диоксид кремния — нитрид кремния [33]; диоксид кремния — металл — диоксид кремния [44].

В каталитических пленочных слоях инициируется реакция каталитического окисления горючих газов с выделением теплоты. Эти слои используются в термокаталитических газовых микросенсорах для преобразования концентрации горючих газов в тепловой сигнал. Основным требованием к каталитическим слоям является обеспечение высокой каталитической эффективности, которая может быть определена как отношение тепловой мощности, выделяемой в слое, к концентрации горючего газа. Высокая каталитическая эффективность достигается в основном за счет увеличения эффективной поверхности каталитического слоя путем увеличения его пористости. В качестве материала для каталитических слоев используются платина [21, 26, 41] и палладий [21, 40, 68]. В целях повышения каталитической эффективности в качестве данных слоев применяют также слой композиционного материала Al_2O_3/Pt , полученный специальными методами [26, 69]. Он имеет пористую структуру, состоящую из кристаллитов Al_2O_3 , на поверхность которых нанесена платина.

Термочувствительные элементы. Термочувствительные элементы выполняют функцию преобразования значения температуры в электрический сигнал, так как согласно функциональным схемам различных типов тепловых микросенсоров [6] непосредственно измеряемой величиной из тепловых параметров является температура. В качестве термочувствительных элементов в тепловых микросенсорах используются терморезистивные, термемкостные, термоэлектрические и пирозлектрические преобразователи и термочувствительные элементы на основе $p-n$ -перехода.

А. Терморезистивные элементы. Принцип действия терморезистивных элементов основывается на зависимости удельного сопротивления резистивного материала от температуры. В тепловых микросенсорах используются терморезистивные элементы на основе различных материалов: металлов, поликристаллических полупроводниковых оксидных материалов, поли- и монокристаллических классических полупроводниковых материалов, поликристаллических сегнетоэлектрических материалов, материалов с фазовым переходом "металл — диэлектрик".

В тепловых микросенсорах терморезистивные элементы на основе чистых металлов и сплавов применяются в виде тонкопленочных резисторов, имеющих форму меандра. Это обусловлено тем, что поверхностное сопротивление тонких пленок металла является малым и коэффициент формы терморезистивных элементов обычно превышает 10. Как известно, меандр занимает относительно большую площадь и это

является сдерживающим фактором при использовании терморезистивных элементов на основе чистых металлов и сплавов в тепловых микросенсорах. В некоторых типах тепловых микросенсоров терморезистивные пленочные элементы на основе чистых металлов и сплавов имеют прямоугольную форму. В этом случае сопротивление терморезистивного элемента не превышает единиц ом. Данный конструктивный вариант целесообразен, когда используются мостовые схемы включения терморезистивных преобразователей. В качестве чувствительных слоев в пленочных терморезистивных элементах на основе чистых металлов используются классические материалы: платина [15, 21, 37, 45, 54, 56, 60], никель [48].

Терморезистивные элементы на основе поликристаллических полупроводниковых оксидных материалов изготавливаются в основном в тонкопленочном исполнении [22, 46]. Вследствие большого удельного поверхностного сопротивления конструктивно термочувствительные элементы на данных материалах выполняются в основном в виде прямоугольных тонкопленочных резисторов. Характерной особенностью термочувствительных элементов на основе поликристаллических полупроводниковых оксидных материалов является относительно большое значение температурного коэффициента сопротивления $\alpha_R = -0,02...-0,06 \text{ K}^{-1}$.

Терморезистивные элементы на основе поли- и монокристаллических классических полупроводниковых материалов широко используются в конструкции тепловых микросенсоров. Основной причиной этого является совместимость технологии получения данных элементов с полупроводниковой технологией. Наиболее применяемым материалом является слаболегированный поликремний *n*- и *p*-типов проводимости [14, 17, 29, 33, 35, 48, 62, 71].

Б. Термоэлектрические элементы. В тепловых микросенсорах в качестве термоэлектрических элементов используются батареи термопар. В основу работы термопар положен эффект Зеебека, который заключается в появлении ЭДС в разомкнутой цепи, изготовленной из двух различных проводников, если между контактами проводников имеется разница температур ΔT . В этом случае ЭДС будет

$$E = (\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T, \quad (1)$$

где α_1, α_2 — коэффициенты термоЭДС материалов проводников.

Как видно из выражения (1), термоэлектрические элементы являются генераторными (активными) сенсорами и измеряют разницу температур, что в отличие от других термочувствительных элементов обеспечивает им ряд особых характеристик (преимуществ):

- при работе термоэлектрические элементы не требуют питания;
- при работе термоэлектрических элементов не требуется смещения;
- выходной сигнал термоэлектрических элементов не имеет смещения и дрейфа;
- выходной сигнал термоэлектрических элементов является потенциальным и поэтому для его измерения не требуется сложного оборудования.

Важным преимуществом термоэлектрических элементов является возможность варьировать их чувствительность путем изменения числа термопар, включаемых последовательно в батарею. Данное преимущество особенно важно для тепловых микросенсоров, так как позволяет использовать материалы, традиционные для микроэлектронной технологии, но имеющие низкий коэффициент термоЭДС. В этом случае, чтобы получить большую чувствительность термоэлектрического элемента, достаточно увеличить число термопар в нем.

Конструктивно термоэлектрические элементы, используемые в тепловых микросенсорах, имеют следующие отличительные особенности. Во-первых, термоэлектрические элементы всегда состоят из большого числа последовательно соединенных термопар. Число термопар определяется рядом требований: чувствительностью, электрическим и тепловым сопротивлением, конструкцией термически изолированной структуры. Во-вторых, чтобы получить стабильный выходной сигнал, холодные спаи термопар термоэлектрического элемента должны иметь постоянную температуру. В тепловых микросенсорах только основание имеет такую температуру, которая обычно равна температуре окружающей среды. Поэтому в большинстве тепловых микросенсоров холодные спаи термопар располагаются на основании. В этом случае используются термически изолированные структуры, которые имеют протяженную линию соединения с основанием. Такими структурами являются консоли, мосты и закрытые мембраны. В-третьих, в тепловых микросенсорах термоэлектрические элементы имеют три конструктивные разновидности термопар: термопары, в которых обе ветви являются пленочными [1, 2, 19, 38, 39, 47, 51, 58, 63, 72, 73]; термопары, в которых одна ветвь является пленочной, а вторая представляет собой полосу *n*- или *p*-типа кремния в кремниевом кармане, подвешенном к термически изолированной структуре [1]; термопары, в которых отрицательные и положительные ветви являются, соответственно, полосками *n*- и *p*-типа кремния в кремниевом кармане, подвешенном к термически изолированной структуре [1]. В тепловых микросенсорах используются следующие пленочные термопары: алюминий — поликремний [11, 38, 39, 51]; золото — поликремний [47, 73]; Bi—Sb [58]; Cu—CuNi [63]; Bi_{0,9}Sb_{0,1}—Sb [72].

В. Термочувствительные элементы на основе *p*—*n*-перехода. Принцип действия термочувствительных элементов на основе *p*—*n*-перехода заключается в зависимости вольтамперной характеристики данного перехода от температуры. Два параметра вольтамперной характеристики *p*—*n*-перехода могут быть использованы для измерения температуры: падение напряжения на *p*—*n*-переходе при его прямом включении; ток через *p*—*n*-переход при его обратном включении. При температурах до 120 °С падение напряжения при прямом включении кремниевых *p*—*n*-перехода линейно зависит от температуры. Данная зависимость имеет температурный коэффициент, равный 1,9...2,1 мВ/К. Ток через *p*—*n*-переход при

его обратном включении экспоненциально зависит от температуры.

По сравнению с терморезистивными и термоэлектрическими элементами термочувствительные элементы на основе $p-n$ -перехода не получили широкого распространения в тепловых микросенсорах. Это связано с особенностями их конструкции и получения. В активной зоне теплового микросенсора термочувствительный элемент на основе $p-n$ -перехода располагают под термически изолированной структурой в специальном кармане (см. рис. 4, б), получаемом методом анизотропного травления со стоп-слоем [31, 44], либо в термически изолированной структуре [65, 74].

Г. Пирозлектрические и термемкостные элементы. Пирозлектричество обусловлено температурной зависимостью спонтанной поляризации определенных некубических кристаллов и полимерных материалов. Эти материалы относятся к сегнетоэлектрическим материалам. Феноменологически пирозлектричество заключается в генерации поверхностного заряда, когда изменяется температура материала. При постоянной температуре указанный поверхностный заряд компенсируется за счет объемной и поверхностной проводимости материала. Поэтому пирозлектрические термочувствительные элементы могут функционировать только при модулированном или пульсирующем входном воздействии (температура). Другим недостатком пирозлектрических термочувствительных элементов является то, что они относятся к классу емкостных элементов и, соответственно, имеют высокое выходное сопротивление. Это создает трудности в согласовании пирозлектрического элемента с последующей измерительной схемой, так как необходимо использовать схемы с высоким входным сопротивлением и низкой входной емкостью.

Принцип действия термемкостных элементов основан на зависимости диэлектрической проницаемости материала диэлектрического слоя от температуры. В тепловых микросенсорах термемкостные и пирозлектрические элементы не получили широкого распространения. Термемкостный элемент использован в качестве термочувствительного элемента в микроболометре [55], а пирозлектрический элемент — в тепловом приемнике излучения [23]. Ограниченность применения термемкостных и пирозлектрических элементов связана с необходимостью использования переменного электрического сигнала при их работе. Конструктивно данные элементы выполняются в виде прямоугольных структур металл—диэлектрик—металл, в которых диэлектрик является либо материалом, диэлектрическая проницаемость которого зависит от температуры, либо пирозлектрическим материалом (полярный диэлектрик).

Пленочные проводники и контактные площадки. Пленочные проводники необходимы для электрического соединения между собой элементов тепловых микросенсоров (резистивные нагреватели, термочувствительные элементы, контактные площадки). Контактные площадки служат для присоединения электрических выводов (проволочные выводы, шариковые, столбиковые и балочные выводы) внеш-

них соединений и обычно их располагают на основании теплового микросенсора. Если микросенсор используется в корпусном варианте, то внешними соединениями являются выводы корпуса. Если микросенсор интегрируется в более общее измерительное устройство, то внешними соединениями являются выводы этого устройства. При использовании микросенсора в бескорпусном варианте проволочные выводы привариваются или припаиваются к контактными площадкам, а шариковые, столбиковые или балочные выводы формируются на контактных площадках.

Общие требования, предъявляемые к материалам, используемым для изготовления коммутационных элементов и контактных площадок тепловых микросенсоров, следующие: малое удельное поверхностное сопротивление; высокая адгезия к подложке; невзаимодействие с материалом подложки как при комнатной температуре, так и при рабочей температуре теплового микросенсора; высокая коррозионная стойкость. Полностью удовлетворить данным требованиям один материал не может, поэтому в качестве коммутационных элементов и контактных площадок используются многослойные системы. В двухслойных системах нижний слой обеспечивает высокую адгезию к подложке, а верхний слой — выполнение всех остальных требований. В трехслойных системах нижний слой обеспечивает высокую адгезию к подложке; средний слой — выполнение электрических требований (высокую электропроводность); верхний слой — защитные свойства, коррозионную стойкость, параметры электрического контакта.

В целях упрощения технологии и уменьшения стоимости в большинстве тепловых микросенсоров для изготовления коммутационных элементов и контактных площадок используются одинаковые материалы и технологические методы. Чаще всего используются стандартные технологические методы изготовления этих элементов. Однако в ряде случаев (тепловые микросенсоры, работающие при высоких температурах) эти элементы изготавливаются из разных материалов, так как коммутационные элементы находятся на термически изолированной структуре и подвергаются воздействию высоких температур, а контактные площадки, расположенные на основании имеют температуру, близкую к температуре окружающей среды. В тепловых микросенсорах, работающих при невысоких температурах (не более 200 °С), обычно в качестве материала коммутационных элементов и контактных площадок используются алюминий [31, 33, 35, 64, 65, 67, 72] с адгезионным подслоем. В тепловых микросенсорах, работающих при высоких температурах (более 200 °С), в качестве материала данных элементов используются золото [14, 22, 23, 46, 62, 63, 73] или платина [21, 23, 55] также с адгезионным подслоем. В качестве адгезионного подслоя в тепловых микросенсорах используются тонкие слои хрома, титана, никрома.

Другие элементы. Кроме указанных выше элементов в тепловых микросенсорах используются элементы, выполняющие другие функции. В тепловых микросенсорах с температурной активацией и управлением это чувствительные элементы, которые

выполняют функцию преобразования входной измеряемой величины в выходной сигнал сенсора, которая активируется при высоких температурах. К этим элементам относятся газочувствительные элементы на основе оксидных полупроводниковых материалов [24], твердых электролитов [75] и химически чувствительных структур металл—диэлектрик—полупроводник и металл—полупроводник [76]. Эти элементы рассматриваться в данной статье не будут, так как они подробно обсуждаются в статьях, посвященных газовым микросенсорам.

В некоторых конструкциях тепловых микросенсоров для выравнивания распределения температуры в локальной области [67] и управления потоками теплоты используются температуровыравнивающие теплопроводящие элементы. Они представляют собой пленочные слои определенной формы, изготовленные из материалов с высокой теплопроводностью (золото, алюминий).

В тепловых микросенсорах также используются изолирующие слои, которые осуществляют гальваническую развязку между электрическими элементами микросенсора. Обычно изолирующие слои изготавливают из диоксида или нитрида кремния [29, 62, 67, 72].

В тепловых микросенсорах температура термически изолированной структуры с расположенными на ней элементами выше температуры окружающей среды. При эксплуатации тепловых микросенсоров это способствует интенсивному воздействию агрессивных компонентов окружающей среды на материалы элементов теплового микросенсора и приводит к деградации параметров элементов микросенсоров. В целях предотвращения деградации для защиты от воздействия агрессивных компонентов в тепловых микросенсорах используют защитные (пассивирующие) слои [14, 46, 70, 72], которые изготавливают из диоксида или нитрида кремния, а также фоторезистов.

В некоторых тепловых микросенсорах используются уникальные элементы. Например, в работе [56] для предотвращения взаимодействия между кремнием, из которого изготовлен один из слоев термически изолированной структуры, и платиной, являющейся материалом резистивного слоя нагревателя и термочувствительного элемента, используется промежуточный тонкопленочный слой. Этот слой изготовлен из оксида магния. Такая конструкция обеспечивает работоспособность теплового микросенсора при температурах термически изолированной структуры 100...580 °С. Другим примером является использование отражающего слоя. Так, в конструкции микроболометра, предложенного в работе [46], под термически изолированной структурой, изготовленной путем травления жертвенного слоя, на поверхность основания нанесен металлический отражающий слой из золота. Толщина зазора между этим слоем и термически изолированной структурой равна четверти длины волны падающего излучения, что увеличивает поглощение данного излучения в термически изолированной структуре, и соответственно, чувствительность микроболометра.

В тепловых микросенсорах с инерционной массой [13, 77] важным является элемент, выполняю-

щий функцию инерционной массы. Он изготавливается путем анизотропного травления кремния и представляет собой участок пластины кремния, подвешенный на тонких балочных консольных мостах к основанию из кремния [13, 77]. Данная конструкция закрепляется на основании теплового микросенсора над термически изолированной структурой таким образом, чтобы между термически изолированной структурой и элементом с инерционной массой был зазор.

Объединение функций элементов в тепловых микросенсорах. В ряде конструкций тепловых микросенсоров используются элементы, которые выполняют несколько функций. В этом случае упрощается конструкция теплового микросенсора и, соответственно, технология его изготовления. В частности, пленочный резистор может одновременно выполнять функции теплогенерирующего и термочувствительного (терморезистор) элементов. Такие элементы используются в тепловых микросенсорах для измерения потоков газа и жидкости [27, 37], в вакуумных тепловых микросенсорах (сенсор Пирани) [9] и в термокаталитических газовых микросенсорах (пеллесторах) [21]. В тепловых приемниках излучения функция преобразования энергии излучения в тепловую энергию может выполняться верхней контактной площадкой пироэлектрического термочувствительного элемента [23].

Отсутствие некоторых элементов. В различных типах тепловых микросенсоров используются различные сочетания перечисленных выше элементов. Для каждого типа теплового микросенсора в соответствии с его функциональной схемой [6] характерно определенное сочетание базовых элементов. Однако в ряде конструкций тепловых микросенсоров некоторые базовые элементы могут отсутствовать. Данное отсутствие элементов обусловлено рядом причин, которые связаны с конкретным типом теплового микросенсора, но в общем это отсутствие направлено на повышение эффективности работы микросенсора. В связи этим требуется отдельное рассмотрение отсутствия каждого конкретного базового элемента.

1. **Отсутствие термически изолированной структуры.** Как отмечалось ранее, одной из функций термически изолированной структуры является передача теплоты от теплогенерирующего элемента к термочувствительному элементу. Однако, если функции теплогенерирующего и термочувствительного элементов объединены и их выполняет один многофункциональный элемент, то в этом случае указанная функция термически изолированной структуры отпадает. Выполнение остальных функций термически изолированной структуры (механическое крепление многофункционального элемента, тепловая изоляция между активной областью многофункционального элемента и основанием) может взять на себя сам этот элемент. При этом изменяется конструкция многофункционального элемента (рис. 6). Его резистивный слой выполняется подвешенным, а контактные площадки располагаются на основании. Чаще всего термически изолированная структура отсутствует в тепловых микросенсорах, используемых для измерения потоков газов (микроанемометры) [78]

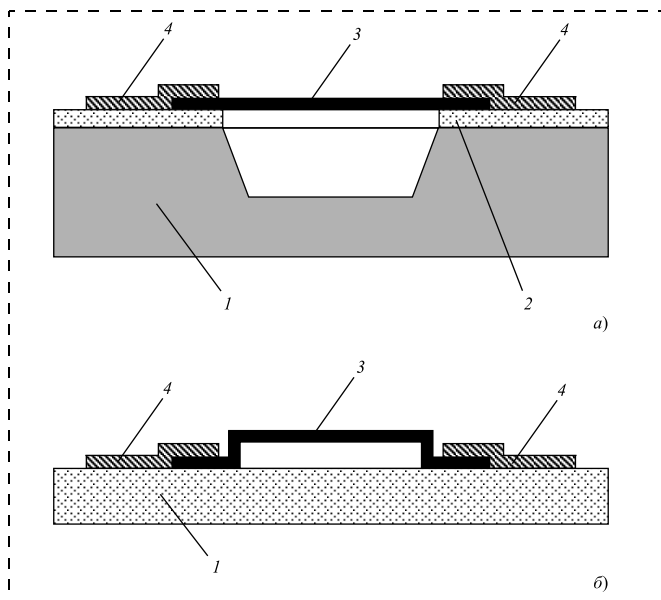


Рис. 6. Тепловые микросенсоры без термически изолированной структуры:

а — тепловой микросенсор, полученный анизотропным травлением кремния; *б* — тепловой микросенсор, полученный травлением жертвенного слоя; 1 — основание; 2 — изолирующий слой; 3 — резистивный слой; 4 — пленочные проводники и контактные площадки

и для измерения вакуума (сенсор Пирани) [79], а также в тепловых инклинометрах [80].

2. *Отсутствие термочувствительного элемента.* В микросенсорах с температурной активацией часто не требуется точно знать температуру нагрева основного чувствительного элемента. Эту температуру можно приближенно определять по режиму питания нагревательного элемента. В этом случае нецелесообразно использовать термочувствительный элемент, что значительно упрощает конструкцию и технологию изготовления данных микросенсоров [24].

Заключение

Представленный анализ позволяет выделить следующие основные конструктивные особенности тепловых микросенсоров.

1. Конструкция тепловых микросенсоров обеспечивает протекание тепловых и электрических процессов и механические параметры данных микросенсоров. Высокая эффективность преобразования входной измеряемой величины в выходной электрический сигнал обусловлена выполнением всех элементов микросенсоров в микроэлектронном исполнении.

2. Основными конструктивными элементами в большинстве тепловых микросенсоров является основание, термически изолированная структура, в которой протекают тепловые процессы, определяющие функционирование микросенсора, теплогенерирующий и термочувствительный элементы.

3. При расположении элементов на термически изолированной структуре используются три основных подхода: вертикальное расположение элементов на верхней поверхности структуры; вертикальное расположение элементов на верхней и нижней по-

верхностях структуры; горизонтальное расположение элементов на верхней поверхности структуры.

4. Термически изолированная структура и элементы, расположенные на ней имеют в основном прямоугольную форму; часто используются термически изолированные структуры и элементы, имеющие определенную симметрию (зеркальная симметрия, ось симметрии 2-го или 4-го порядков). Крепление термически изолированной структуры проводится по середине или по углам прямоугольной области с соблюдением симметрии. Толщина термически изолированной структуры и элементов, расположенных на ней, гораздо меньше их длины и ширины.

Представленный анализ конструктивных особенностей тепловых микросенсоров является основой для разработки базовых принципов проектирования тепловых микросенсоров различных типов. Данное проектирование должно быть направлено на получение оптимальной конструкции теплового микросенсора, обеспечивающей высокие эксплуатационные качества при минимальных материальных и технологических затратах. Рассмотренные конструктивные особенности тепловых микросенсоров, в свою очередь, приводят к особенностям в технологии их изготовления и к особенностям моделирования процессов в данных микросенсорах. Эти вопросы требуют отдельного рассмотрения.

Список литературы

1. Van Herwaarden A. W., Sarro P. M. Thermal sensors based on the Seebeck effect // *Sensors and Actuators*. 1986. V. 10. P. 321—346.
2. Van Herwaarden A. W., van Duyn D. C., van Oudheusden B. W., Sarro P. M. Integrated thermopile sensors // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1989. V. 21—23. P. 621—630.
3. Van Herwaarden S. Physical principles of thermal sensors // *Sensors and Materials*. 1996. V. 8. P. 373—387.
4. Baltes H., Paul O., Brand O. Micromachined thermally based CMOS microsenors // *Proc. of the IEEE*. 1998. V. 86. P. 1660—1678.
5. Akin T. CMOS-based thermal sensors // *Advanced micro and nanosystems* / Ed. by H. Baltes et al. Weinheim: Wiley-VCH. 2005. V. 2. CMOS-MEMS. P. 479—512.
6. Козлов А. Г. Тепловые микросенсоры: классификация, основные типы // *Нано- и микросистемная техника*. 2006. № 4. С. 2—13.
7. Васильев А. А., Гогиш-Клушин С. Ю., Харитонов Д. Ю., Паранджапе М., Певгов В. Г., Писляков А. В. Новый подход к микромашиной технологии изготовления сенсоров: микроэлектронные чипы с тонкой мембраной из оксида алюминия // *Сенсор*. 2002. № 3. С. 23—29.
8. Dehé A., Fricke K., Hartnagel H. L. Infrared thermopile sensor based on AlGaAs—GaAs micromachining // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1995. V. 46—47. P. 432—436.
9. Chou B. S. C., Chen C.-N., Shie J.-S. Micromachining on (111)-oriented silicon // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1999. V. 75. P. 271—277.
10. Baltes H. Future of IC microtransducers // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1996. V. 56. P. 179—192.
11. Sarro P. M., Yashiro H., van Herwaarden A. V., Middelhoek S. An integrated thermal infrared sensing array // *Sensors and Actuators*. 1988. V. 14. P. 191—201.
12. Van Herwaarden A. W., Sarro P. M. Performance of integrated thermopile vacuum sensors // *J. Physics E: Scientific Instruments*. 1988. V. 21. P. 1162—1167.
13. Dauderstädt U. A., de Vries P. H. S., Hiratsuka R., Sarro P. M. Silicon accelerometer based on thermopiles // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1995. V. 46—47. P. 201—204.

14. Neda T., Nakamura K., Takumi T. A polysilicon flow sensor for gas flow meters // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1996. V. 54. P. 626–631.
15. Van Baar J. J., Wiegerink R. J., Lammerink T. S. J., Krijnen G. J. M., Elwenspoek M. Micromachined structures for thermal measurements of fluid and flow parameters // *J. of Micro-mechanics and Microengineering*. 2001. V. 11. P. 311–318.
16. Van Baar J. J., Wiegerink R. J., Lammerink T. S. J., Krijnen G. J. M., Elwenspoek M. Pirani pressure sensor with distributed temperature sensing // *Proceedings of IMECE'01 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, New York, 2001. P. 1–8.
17. Paul O., Baltes H. Thermal conductivity of CMOS materials for the optimization of microsensors // *Journal of Micro-mechanics and Microengineering*. 1993. V. 3. P. 110–112.
18. Schneeberger N. CMOS microsystems for thermal presence detection // Ph. D. thesis no 12675, ETH Zurich, Switzerland. 1998. 138 p.
19. Schieferdecker J., Quad R., Holzenkämpfer E., Schulze M. Infrared thermopile sensors with high sensitivity and very low temperature coefficient // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1995. V. 46–47. P. 422–427.
20. Van Herwaarden A. W., Sarro P. M., Gardner J. W., Baillaud P. Liquid and gas micro-calorimeters for (bio)chemical measurements // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1994. V. 43. P. 24–30.
21. Zanini M., Visser J. H., Rimai L., Soltis R. E., Kovalchuk A., Hoffman D. W., Logothetis E. M., Bonne U., Brewer L., Bynum O. W., Richard M. A. Fabrication and properties of a Si-based high-sensitivity microcalorimetric gas sensor // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1995. V. 48. P. 187–192.
22. Lee M., Yoo M. Detectivity of thin-film NTC thermal sensors // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2002. V. 96. P. 97–104.
23. Ko J. S., Liu W., Zhu W. Substrate effects on the properties of the pyroelectric thin film IR detectors // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2001. V. 93. P. 117–122.
24. Simon I., Bársan N., Bauer M., Weimar U. Micromachined metal oxide gas sensors: opportunities to improve sensor performance // *Sensors and Actuators B. Chemical*. 2001. V. 73. P. 1–26.
25. Chung W.-Y., Lim J.-W., Lee D.-D., Miura N., Yamazoe N. Thermal and gas-sensing properties of planar-type micro gas sensor // *Sensors and Actuators B. Chemical*. 2000. V. 64. P. 118–123.
26. Aigner R., Dietl M., Katterloher R., Klee V. Si-planar-pellistor: designs for temperature modulated operation // *Sensors and Actuators B. Chemical*. 1996. V. 33. P. 151–155.
27. Hung S.-T., Wong S.-C., Fang W. The development and application of microthermal sensors with a mesh-membrane supporting structure // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2000. V. 84. P. 70–75.
28. Gajda M. A., Ahmed H. Applications of thermal silicon sensors on membranes // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1995. V. 49. P. 1–9.
29. Sedky S., Fiorini P., Gaymax M., Verbist A., Baert C. IR bolometers made of polycrystalline silicon germanium // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1998. V. 66. P. 193–199.
30. Cavicchi R. E., Walton R. M., Aquino-Class M., Allen J. D., Panchapakesan B. Spin-on nanoparticle tin oxide for microhotplate gas sensors // *Sensors and Actuators B. Chemical*. 2001. V. 77. P. 145–154.
31. Klaassen E. H., Reay R. J., Kovacs G. T. A. Diode-based thermal r.m.s. converter with on-chip circuitry fabricated using CMOS technology // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1996. V. 52. P. 33–40.
32. Qian X., Xua Y. P., Karunasiri G. Self-heating cancellation circuits for microbolometer // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2004. V. 111. P. 196–202.
33. Dong L., Yue R., Liu L. An uncooled microbolometer infrared detector based on poly-SiGe thermistor // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2003. V. 105. P. 286–292.
34. Zhang L., Yang G. Design, simulation and testing on a light modulating thermal image device // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2001. V. 11. P. 85–93.
35. Parameswaran M., Robinson A. M., Ristic Lj., Chau K., Allegretto W. A CMOS thermally isolated gas flow sensor // *Sensors and Materials*. 1990. V. 2. № 1. P. 17–26.
36. Fung S. K. H., Tang Z., Chan P. C. H., Sin J. K. P., Cheung P. W. Thermal analysis and design of a micro-hotplate for integrated gas-sensor applications // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1996. V. 54. P. 482–487.
37. Mailly F., Giani A., Bonnot R., Temple-Boyer P., Pascal-Delannoy F., Foucaran A., Boyer A. Anemometer with hot platinum thin film // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2001. V. 94. P. 32–38.
38. Bruschi P., Diligenti A., Navarrini P., Piotta M. A double heater integrated gas sensor with thermal feedback // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2005. V. 123–124. P. 210–215.
39. Socher E., Bochobza-Degani O., Nemirovsky Y. A novel spiral CMOS compatible micromachined thermoelectric IR microsensor // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2001. V. 11. P. 574–576.
40. Cavicchi R. E., Poirier G. E., Tea N. H., Afridi M., Berning D., Hefner A., Suehle J., Gaitan M., Semancik S., Montgomery C. Micro-differential scanning calorimeter for combustible gas sensing // *Sensors and Actuators B. Chemical*. 2004. V. 97. P. 22–30.
41. Fürjes P., Ádám M., Dücsó Cs., Zettner J., Bársony I. Thermal effects by the sensitive coating of calorimetric gas sensors // *Sensors and Actuators B. Chemical*. 2005. V. 111–112. P. 96–101.
42. Rossi C., Temple-Boyer P., Estève P. Realization and performance of thin SiO₂/SiN_x membrane for microheater applications // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1998. V. 64. P. 241–245.
43. Möler S., Lin J., Obermeier E. Material and design considerations for low-power microheater modules for gas-sensor applications // *Sensors and Actuators B. Chemical*. 1995. V. 24–25. P. 343–346.
44. Eminoglu S., Tezcan D. S., Tanrikulu M. Y., Akin T. Low-cost uncooled infrared detectors in CMOS process // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2003. V. 109. P. 102–113.
45. Dücsó Cs., Vázsonyi É., Ádám M., Szabó I., Bársony I., Gardeniers J. G. E., van den Berg A. Porous silicon bulk micromachining for thermally isolated membrane formation // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1997. V. 60. P. 235–239.
46. Nguyen C.-A., Shin H.-J., Kim K. T., Han Y.-H., Moon S. Characterization of uncooled bolometer with vanadium tungsten oxide infrared active layer // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2005. V. 123–124. P. 87–91.
47. Ashauer M., Glosch H., Hedrich F., Hey N., Sandmaier H., Lang W. Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1999. V. 73. P. 7–13.
48. Glaninger A., Jachimowicz A., Kohl F., Chabicovsky R., Urban G. Wide range semiconductor flow sensors // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2000. V. 85. P. 139–146.
49. Grudin O. M., Frolov G. A., Katsan I. I., Lupina B. I. Thermal microsensor with a.c. heating for gas-pressure measurements // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1997. V. 62. P. 571–575.
50. Kaltsas G., Nassiopoulou A. G. Novel C-MOS compatible monolithic silicon gas flow sensor with porous silicon thermal isolation // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1999. V. 76. P. 133–138.
51. Pagonis D. N., Kaltsas G., Nassiopoulou A. G. Fabrication and testing of an integrated thermal flow sensor employing thermal isolation by a porous silicon membrane over an air cavity // *J. of Micromechanics and Microengineering*. 2004. V. 14. P. 793–797.
52. Tsamis C., Nassiopoulou A. G., Tserepi A. Thermal properties of suspended porous silicon micro-hotplates for sensor applications // *Sensors and Actuators B. Chemical*. 2003. V. 95. P. 78–92.
53. Lysenko V., Périchon S., Remaki B., Barbier D. Thermal isolation in microsystem with porous silicon // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2002. V. 99. P. 13–24.
54. Kim S., Kim S., Kim Y., Park S. A circular-type thermal flow direction sensor free from temperature compensation // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2003. V. 108. P. 64–68.
55. Liua S.-J., Zeng X.-B., Chua J.-H. Thermal-sensitive BST thin film capacitors for dielectric bolometer prepared by RF magnetron sputtering // *Microelectronics J.* 2004. V. 35. P. 601–603.

56. **Chung G.-S.** Fabrication and characterization of microheaters with low-power consumption using SOI membrane and trench structures // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2004. V. 112. P. 55–60.

57. **Simon I., Arndt M.** Thermal and gas-sensing properties of a micromachined thermal conductivity sensor for the detection of hydrogen in automotive applications // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2002. V. 97–98. P. 104–108.

58. **Kim J.-S., Lee H.-C., Lee J.-H., Lee J.-H., Park S. I., Kwon S.-W.** A Planar Bi–Sb Multijunction Thermal Converter With Small AC–DC Transfer Differences // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2002. V. 51. P. 115–119.

59. **Kinard J. R., Novotny D. B., Lipe T. E., Huang D.-X.** Development of thin-film multijunction thermal converters at NIST // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1997. V. 46. P. 347–351.

60. **Wiche G., Berns A., Steffes H., Obermeier E.** Thermal analysis of silicon carbide based micro hotplates for metal oxide gas sensors // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2005. V. 123–124. P. 12–18.

61. **Lee D.-D., Chung W.-Y., Choi M.-S., Baek J.-M.** Low-power micro gas sensor // *Sensors and Actuators B. Chemical*. 1996. V. 33. P. 147–150.

62. **Sheng L., Tang Z., Wu J., Chan P. C. H., Sin J. K. O.** A low-power CMOS compatible integrated gas sensor using maskless tin oxide sputtering // *Sensors and Actuators B. Chemical*. 1998. V. 49. P. 81–87.

63. **Klonz M., Weimann T.** Accurate thin film multijunction thermal converter on a silicon chip // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1989. V. 38. P. 335–337.

64. **Klaassen E. H., Kovacs G. T. A.** Integrated thermal-conductivity vacuum sensor // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1997. V. 58. P. 37–42.

65. **Udrea F., Gardner J. W., Setiadi D., Covington J. A., Dogaru T., Lu C. C., Milne W. I.** Design and simulations of SOI CMOS micro-hotplate gas sensors // *Sensors and Actuators B. Chemical*. 2001. V. 78. P. 180–190.

66. **Lang W., Kühl K., Sandmaier H.** Absorbing layers for thermal infrared detectors // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1992. V. 34. P. 243–248.

67. **Elbel T.** Miniaturized thermoelectric radiation sensors // *Sensors and Materials*. 1991. V. 3. № 2. P. 97–109.

68. **Lee S. M., Dyer D. C., Gardner J. W.** Design and optimisation of a high-temperature silicon micro-hotplate for nano-

porous palladium pellistors // *Microelectronics J.* 2003. V. 34. P. 115–126.

69. **Lee J. S., Park J. W., Shin S. M.** Fabrication of a micro catalytic gas sensor using thin film process and Si anisotropic etching techniques // *Sensors and Actuators B. Chemical*. 1997. V. 45. P. 265–269.

70. **Paul O., Baltes H.** Novel fully CMOS-compatible vacuum sensor // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1995. V. 46–47. P. 143–146.

71. **Jiang L., Wong M., Zohar Y.** Micromachined polycrystalline thin film temperature sensors // *Measurement Science and Technology*. 1999. V. 10. P. 653–664.

72. **Völklein F., Schnelle W.** A vacuum microsensor for the low-vacuum range // *Sensors and Materials*. 1991. V. 3. № 1. P. 41–48.

73. **Baer W. G., Najafi K., Wise K. D., Toth R. S.** A 32-element micromachined thermal imager with on-chip multiplexing // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1995. V. 48. P. 47–54.

74. **Saul C. K., Zemel J. N.** Diode-based microfabricated hot-plate sensor // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1998. V. 65. P. 128–135.

75. **Козлов А. Г., Удод А. Н.** Газовые сенсоры на основе высокотемпературных протонпроводящих твердых электролитов: состояние и перспективы развития // *Сенсор*. 2004. № 3. С. 2–21.

76. **Briand D., Sundgren H., van der Schoot B., Lundström I., de Rooij N. F.** Thermally isolated MOSFET for gas sensing applications // *IEEE Electron device letters*. 2001. V. 22. P. 11–13.

77. **Козлов А. Г.** Моделирование распределения температуры в структуре теплового микроакселерометра с инерционной массой // *Нано- и микросистемная техника*. 2005. № 6. С. 22–33.

78. **Elwenspoek M., Wiegerink R.** *Mechanical microsensors*. — Berlin et al: Springer, 2001. — 295 p.

79. **Puers R., Reyntjens S., de Bruyker D.** The NanoPirani — an extremely miniaturized pressure sensor fabricated by focused ion beam rapid prototyping // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2002. V. 97–98. P. 208–214.

80. **Billat S., Glosch H., Kunze M., Hedrich F., Frech J., Auber J., Sandmaier H., Wimmer W., Lang W.** Micromachined inclinometer with high sensitivity and very good stability // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2002. V. 97–98. P. 125–130.

УДК 621.049.77:001.891.57

К. Д. Яшин, канд. техн. наук, **В. С. Осипович**, **Т. Г. Божко**,
Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, г. Минск

РАЗРАБОТКА МЭМС

Представлен обзор ведущих разработчиков МЭМС.

Введение

Информационный портал www.allaboutmems.com хранит фотографии сложнейших МЭМС (рис. 1, 2), а также информацию о применениях:

- в автомобилях в качестве акселерометров подушек безопасности;

- в струйных принтерах в виде микронасадок для подачи чернил;
- в космических аппаратах в виде навигационных гироскопов;
- в приборах оценки природных условий в виде датчиков контроля окружающей среды;
- в медицине как преобразователи давления крови;

- в радиоиндустрии;
- в волоконно-оптических сетях связи в виде оптических пере-

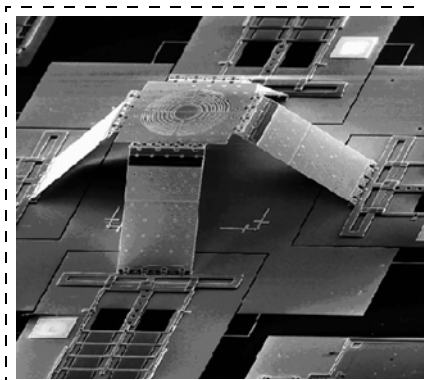


Рис. 1. Интегрированные линзы



Рис. 2. Диск из полимера

ключателей на микрозеркалах и т. д.

Микрозеркала представляют собой микромеханический элемент оптического переключателя. Они переводят световые лучи от одного набора стекловолокон к другому. Микрозеркало включает в себя порт ввода-вывода света, микропривод и отражающую поверхность. Напряжение подается к микроприводу (микродвигателю), это заставляет зеркало перемещаться и направлять луч к определенному порту.

МЭМС-выключатели надежны в применении. Микровыключатели состоят из множества микрозеркал (до сотен тысяч). Зеркальные выключатели могут быть с двумя степенями свободы (двигаются вверх-вниз и влево-вправо), а также могут вращаться. Портал содержит ссылки на университеты и лаборатории, где ведется разработка МЭМС. В обзоре представлены ведущие разработчики.

Institut für Mikrotechnik Mainz (IMM), Германия. Разрабатывает микрореакционные системы, микромоторы, сенсоры для биотехнологии, оптической связи и нанотехники, а именно:

- микросмесители: из стекла (для визуальных исследований); из серебра и никеля (LIGA, для многоструйного потока жидкостей, рис. 3, см. вторую сторону обложки); со специальным расположением входных каналов (течение в форме спирали); для процессов, которые могут привести к засорению системы (образова-

ние осадков от реакций происходит вне микроструктуры);

- микротеплопередатчики (микротеплорадиаторы) перекрестнопоточные и противоточные (стопка микропластин);
- микрореакторы: газожидкостные (для быстрых реакций от нескольких секунд до минуты, рис. 4, см. вторую сторону обложки);
- газо-газовые (гетерофазная реакция происходит на микропластинках, покрытых катализатором); жидкость-жидкостные (с интегрированным микропередатчиком теплоты для обеспечения химической реакции); многофазные (трубчатая микросистема); для фильтрации катализаторов (одновременная обработка до 48 материалов); для электрохимического синтеза (состоят из параллельных пластин электродов); для разделительных процессов (аналитические);
- микроэлектромоторы $5,5 \times 2 \times 1,5$ мм с дисковым ротором, вращают CD и жесткий диски;
- оптические стыковочные микроустройства в форме звезды;
- сканирующие микрозеркала для конфокального микроскопа;
- микролинзы для оптических сенсоров;
- микропризмы для систем, формирующих рисунки.

IMM владеет LIGA, рентгеновской и оптической литографиями. Дальнейшее развитие касается разработки нанотехники, создания нанозондов для растровой электронной микроскопии.

IntelliSense Software, США. Разрабатывает программное обеспечение для проектирования МЭМС — от поведенческой модели до проектирования технологического цикла. Пакет IntelliSuite предназначен для создания:

- ВЧ, СВЧ и электромагнитных МЭМС;
- биоМЭМС и анализаторов;
- сенсоров, микромеханических актуаторов и микродвигателей;
- МОЭМС и оптических микрокомпонентов для ВОЛС.

Имеются четыре модуля пакета:

- IntelliFAB. Разработка технологического маршрута и топологии фотошаблонов;

- AnisE. Моделирование анизотропного травления;
- MEMaterial. Моделирование свойств тонких пленок;
- IntelliMask. Разработки и редактирование фотошаблонов МЭМС.

Innovative Micro Technology (IMT), США. Разрабатывает МЭМС для различных отраслей:

- биомедицины (разделительно-аналитические ячейки);
- биометрического контроля (устройства определения степени безопасности);
- биотехнологии (системы для расшифровки генов; обнаружения мест для открытия лекарства; диагностики болезней);
- навигации (устройства для измерения инерции, имеющие низкие ошибки по g);
- метрологии и формирования изображений (чувствительные консоли для атомно-силовых микроскопов).

IMT разрабатывает:

- струйные микросистемы, полученные литографией микрометровой точности (каналы, клапаны, сопла, печатающие головки);
- оптотелекоммуникационные микросистемы (добавление/удаление ключей, защита от повторного выбора маршрута, быстрое переключение);
- ВЧ микроустройства (электростатические, электромагнитные, емкостные микроактуаторы);
- микровитчи (переключатели для телефонов);
- сенсоры газовые (рис. 5, а, см. вторую сторону обложки), химические (рис. 5, б, см. вторую сторону обложки) и для мониторинга окружающей среды. IMT владеет технологией фотолитографии 0,35 мкм и менее, технологией глубокого травления химически активными ионами (реакционное ионное травление, рис. 5, в, см. вторую сторону обложки).

MEMSCAP, США. Разработчик MUMPs-технологии и САПР, а также производитель МЭМС (рис. 6). MUMPs имеет три разновидности:

- PolyMUMPs стала стандартом поверхностной микрообработки и используется на 150—200 предприятиях;

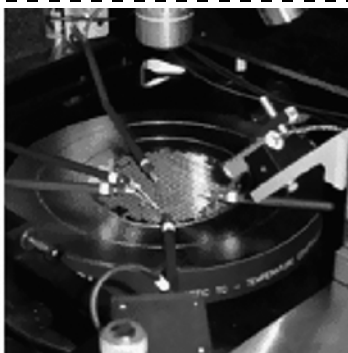


Рис. 6. Микроизделие и техпроцесс

- SOIMUMPs (КНД) применяется для изготовления тепловых и электростатических приводов, оптических телекоммуникационных микроустройств (среди последних — переменные оптические аттенюаторы и вращающиеся зеркала);
 - metalMUMPs применяется для изготовления микрокоммутаторов (свитчей) и микрореле. MEMS CAP разрабатывает сенсоры для аэрокосмических и биомеханических задач. Но основной продукцией является шесть пакетов САПР MEMS:
 - Xplorer (для Unix);
 - Pro (для Windows);
 - Master (оптимизация времени моделирования для отдельных видов микроизделий);
 - MEMS Modeler (быстрое макетирование за счет использования больших библиотек типовых элементов);
 - SYMBA (проектирование аналоговых ИМС);
 - MUMPSstart (рис. 7).
- Технологические возможности фирмы:
- формирование тонких пленок Au, Cr, Al, Cu, Ni, SiO₂, Si₃N₄, полиSi (напыление, термовакуумное испарение, химическое осаждение из газовой фазы);

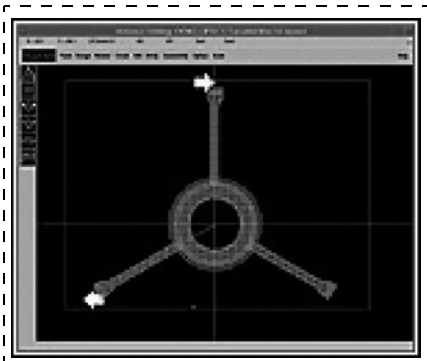


Рис. 7. MUMPSstart

- фотолитографические процессы;
- гальванические процессы и нанесение покрытий методом химического восстановления;
- влажное и сухое травление;
- склеивание подложек (анодное, эвтектическое, полимерное, плавлением);
- резка пластин (кремний, стекло);
- шлифовка и полировка подложек.

MEMSIC, Китай. Разрабатывает сенсоры и акселерометры в виде семейства микросхем MXR72xxC. Крупный покупатель — Texas Instrument (США). Устройства измеряют внутренние перемещения в изменении количества теплоты или энергии, вызванные ускорением тел при движении. Датчики наклона широко используются в приборостроении, автомобильной промышленности. Они применяются в видеопроекторах для корректировки изображения путем автоматической настройки устройства по вертикали и горизонтали. Акселерометры (рис. 8, см. вторую сторону обложки и рис. 9), иногда называемые инерционными датчиками, используются для измерения вибраций, угла наклона или инерционных ускорений. В случае детектирования угла на-



Рис. 9. Двухосный акселерометр

клона в двух плоскостях приемлемая точность измерения достигается при углах наклона $\pm 60^\circ$, в одной плоскости — при углах 360° .

Изделие MXD2020GL используется в Man Down устройствах. Термин применяется в случаях, когда человек находится без сознания или мертв. Устройства необходимы для людей, чья профессия связана с риском для жизни: пожарных, полицейских, шахтеров, военных и т. п. Прибор передает аварийный сигнал на базовую станцию, если человек не подает признаков жизни (не двигается).

MEMS Industry Group (MIG), США. Ассоциация американских разработчиков МЭМС (Intel, Bosch, Solid State Electronics Center, Hactix, EV Group и др.) является информационным звеном МЭМС-промышленности США, разрабатывает специальные отчеты. Члены ассоциации имеют доступ к последним технологическим исследованиям, к обзору и статистике по рынку МЭМС, другой коммерческой информации. MIG является организатором ежегодной конференции METRIC, повышающей технический опыт компаний. Большое внимание уделяется надежности МЭМС, рассматриваются и другие вопросы: проектирование МЭМС, микроволновые МЭМС, устройства с применением МЭМС, мобильные и беспроводные коммуникации, нанотехнология. На рис. 10 представлены возможные применения МЭМС при исследовании организма человека. Ученые в Беркли (США) разрабатывают "умную пыль" (smart dust). Миллионы МЭМС-датчиков плывут в воздухе, собирая информацию о погоде, ветре, влажности, загрязнении. Они могут работать в интересах военных для выявления химических и биологических веществ. Предполагается применение и в других отраслях. В медицине — крошечные хирургические "скребки", введенные в артерию, могут очистить ее от тромбов. "Умные" дороги имеют внедренные МЭМС-устройства. Последние могут передавать водителю через глобальную навигационную систему позиционирования информацию (о состоянии дороги, интенсивности движения, пробках) на бортовой компьютер.

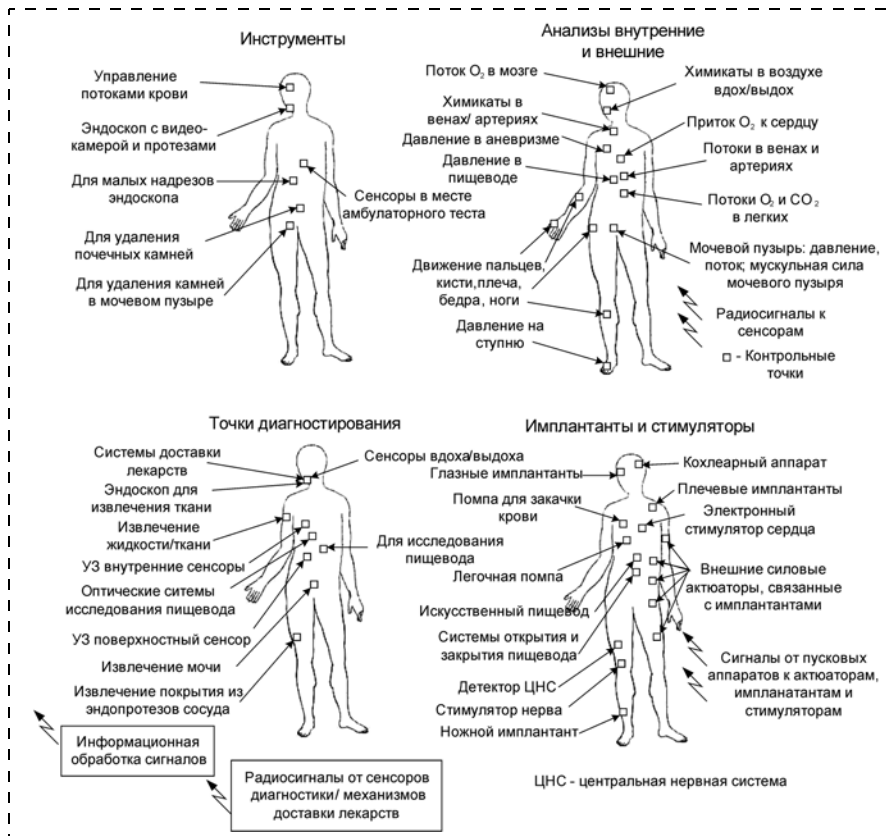


Рис. 10. Применение МЭМС при исследовании человеческого организма

Micromanipulator, США. Разрабатывает технологическое оборудование для измерения параметров и испытания МЭМС, для микроскопии, лазерной обработки, анализа отказов микроустройств, определения оптических характеристик микроизделий. NANO-100 — аналитическая станция для исследования и измерения параметров, отдельно взятых элементов микроизделий, которая обладает следующими возможностями:

- сканирующего электронного микроскопа. Эмиссионный микроскоп FA-2000 — портативный фотонный микроскоп с функцией устранения вибраций прибора, дает устойчивое изображение в микроскопе даже при высоких возмущениях производственной среды, может применяться в сочетании с зондовыми установками контроля параметров микроизделий;
- калибровки пластин при использовании ВЧ и СВЧ аналитического оборудования;
- двухстороннего тестирования МЭМС;
- измерения параметров аналоговых и цифровых схем;

- климатических испытаний МЭМС (контроль параметров проводится в следующих условиях: вакуум, различные температуры, влажность, газовые среды, пыль).

Microsystem Center Bremen, Германия. Включает четыре НИИ, разработки которых касаются обработки сигналов, ASIC-дизайна телеметрии, оптоэлектроники, электронных микровыключателей, матричных переключателей логического ключа (рис. 11, см. вторую сторону обложки). НИИ сенсоров, микроактуаторов и микросистем и НИИ теоретической электро-

ники и микроэлектроники занимаются инновационными проектами использования МЭМС, разрабатывают программное обеспечение (ПО) для моделирования и проектирования, а также методы и устройства для контроля и тестирования МЭМС, имеют лаборатории для изготовления микроприборов.

MOSIS, США. Разрабатывает МЭМС, интегральные микросхемы (ИМС) и печатные платы. Владеет технологическими процессами изготовления микроизделий, включающими до восьми слоев: металл, резисторы, конденсаторные слои, транзисторные структуры и МЭМС (рис. 12). Проводит фотолитографию с минимальными размерами элементов 0,13 мкм. Активно взаимодействует с Amitec (США, поставщик подложек), CMP Technology (США, ПО уравнивания плотности элементов микроизделий), NNTTF (Австралия, тестирование микроизделий).

Tanner Research, США. Состоит из пяти подразделений:

- EDA, разработка САПР;
- CES, разработка ИМС, совместное с заказчиком проектирование микроизделий;
- Manuflex, производство вентиляционных матриц и многокристалльных модулей, обеспечивающих лучшую передачу сигнала в сравнении с печатными платами, намного меньших их по размеру и потребляющих меньше энергии (рис. 13). Изготавливаются ИМС по собственной оригинальной технологии;
- EPD, технологическая поддержка производства ИМС и МЭМС;

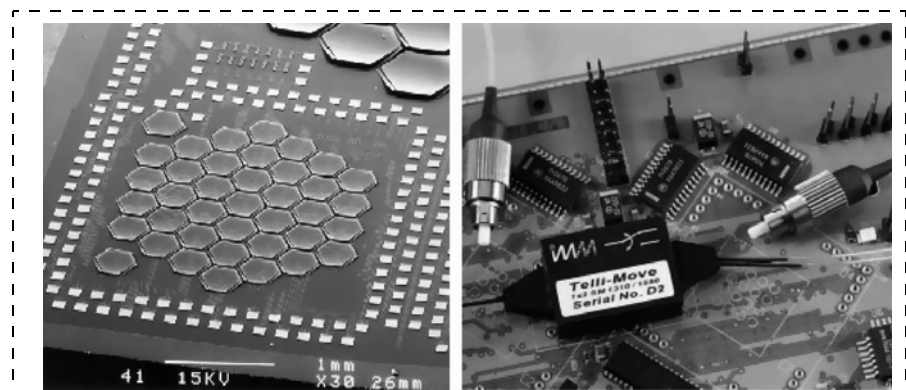


Рис. 12. Микроизделия MOSIS

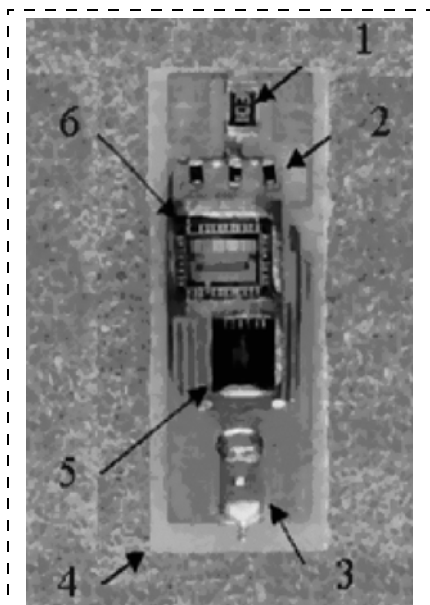


Рис. 13. Многокристалльный модуль:

1 — конденсатор; 2 — транзисторы; 3 — резистор; 4 — плата; 5 — память; 6 — микропроцессор

- Labs, перспективные исследования в области применения ИМС и МЭМС.

Разработаны:

- мультисенсорный модуль;
- модуль обработки сигналов;
- встраиваемая DSP-плата;
- рефлектор по технологии "самосборки" (отражающие микрорезеркала автоматически устанавливаются в нужную позицию);
- лазерная интерферометрия точного измерения деформации и натяжения поверхностей;
- технология распознавания речи для управления компьютером с помощью голосовых команд;

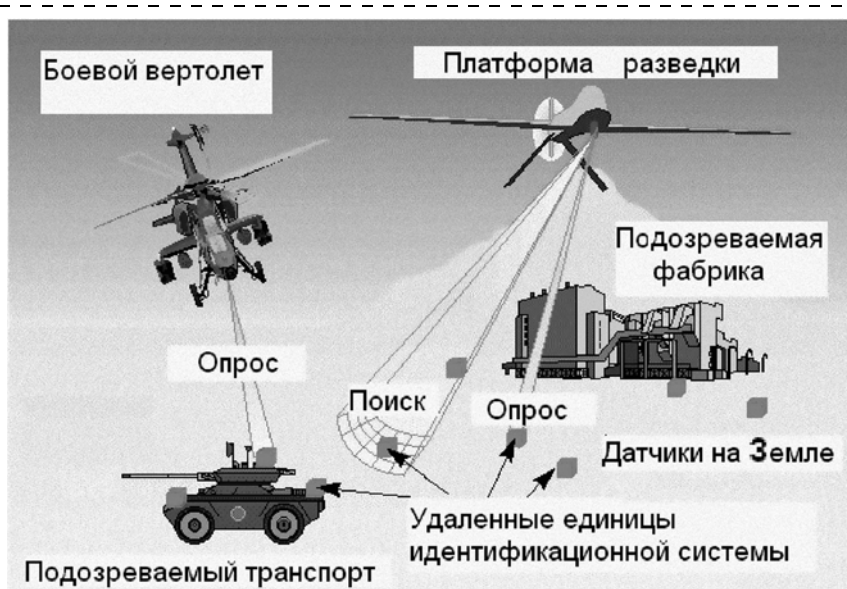


Рис. 15. Система наведения типа "свой — чужой"

- оптическая идентификационная и коммуникационная системы на МЭМС (рис. 14);
- технология обработки информации в системах наведения (рис. 15) и при проектировании роботов.

Созданы четыре пакета САПР от TR EDA:

- Hyper Verify — САПР ИМС, МЭМС и интегрированных оптических приборов;
- L-Edit Pro — проектирование МЭМС под Windows;
- T-Spice Pro — моделирование ИМС, их компонентов и анализ формы сигналов;
- Design Kits — разработка определенных типов аналоговых ИМС.

Модуль L-Edit Pro разработан для электронной части МЭМС и

объединяет редактирование топологии, верификацию, размещение, трассировку, программирование интерфейса. Проектируемые узлы: ячейки индуктивности, емкостей, резисторов и МОП-транзисторов.

Tronic's Microsystems, Франция.

Разрабатывает МЭМС для медицинской, телекоммуникационной и измерительной техники. Специализируется на производстве:

- датчиков (рис. 16);
- оптических микроустройств;
- ВЧ МЭМС;
- микрожидкостных устройств;
- высокоточных микроструктур.

Развивает такие технологические этапы производства МЭМС, как проектирование, моделирование, литография, химическое и плазменное травление, сборка, измерения, испытания готовых микроизделий. Имеет опыт в реализации следующих технологий:

- поверхностной КНД (кремний—надий—диэлектрик) микрообработки с высоким отношением длины элементов к их ширине (рис. 17);

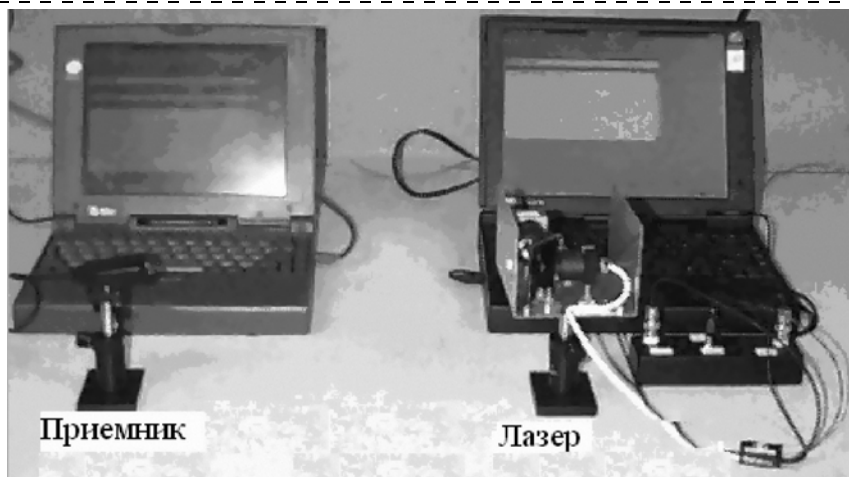


Рис. 14. МЭМС — оптическая линия



Рис. 16. Сейсмический датчик

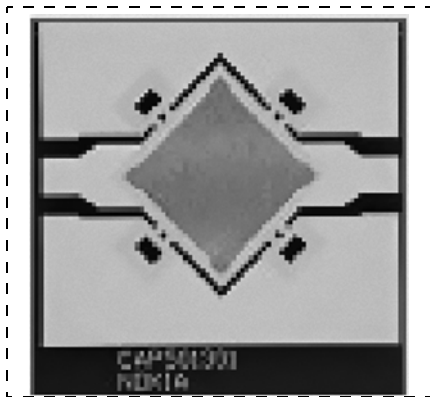


Рис. 17. Поверхностная обработка

- объемной микрообработки;
- формирования металлизированных межсоединений;
- сборки (монтаж в корпус).

Tyndall, Ирландия. Разрабатывает активные и пассивные оптоэлектронные компоненты для волоконной оптики и ее применения в телекоммуникациях. Проводит исследования в следующих областях:

- фотоника (спектроскопия, III–V фотогальваника, оптическая обработка);
- нанотехнология (изготовление нанокристаллов, структур и наносистем (рис. 18, 19)).

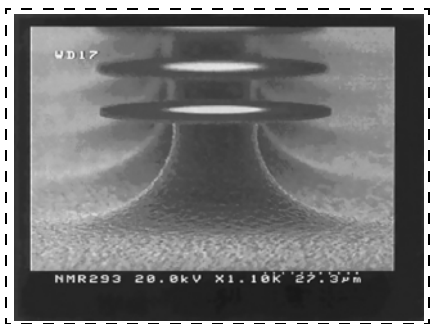


Рис. 18. Изотропное травление Si

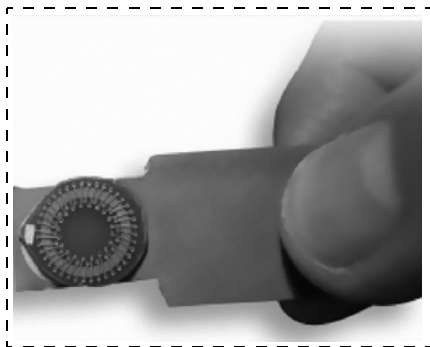


Рис. 19. Датчик магнитных полей

Соединение с биотехнологией развило новые направления:

- самосборка нанокристаллов как альтернатива нанолитографии. Короткие олигонуклеотиды, наносимые на поверхность металлических наночастиц, используются для связывания частиц. Испытан образец наноприбора, созданный на самособранных массивах золотых наночастиц;
- технология химического микроанализа, заключающаяся во введении пикообъемов внутренних инъекций с последующим их анализом без каких-либо последствий для человека. Микрофлюидные системы обеспечивают управление и манипулирование чрезвычайно малыми объемами и ячейками, что применяется при открытии микропрепаратов и анализе этих микрочаек;
- новая технология диагностики ДНК. Эти сложные методы требуют извлечения ДНК из клеточного материала, выделения и очистки нуклеиновой кислоты, а затем обнаружения и анализа определенных наследственных черт. Институт разработал новую технологию выделения ДНК, которая в 60 раз быстрее и дает в 10 раз больше итогового нуклеинового материала.

Verimetra, США. Разрабатывает миниатюрные датчики и микроактюаторы для хирургических инструментов.

Хирургия постоянно стремится к методам, которые минимально сказываются на здоровье человека. Главная цель — минимальное причинение травм пациенту при операции, период восстановления должен быть как можно короче. Датчики улучшают результаты операции, снижают ее риск, помогают управлять процессом операции, обеспечивая хирурга данными о работе хирургического инструмента, а также о плотности ткани, ее температуре и составе. Это позволяет более лучшими методами подготавливать ткани к операции, а также быстро извлекать образцы ткани и жидкостей для исследования.

Разработчики МЭМС работают с медицинскими учреждениями,

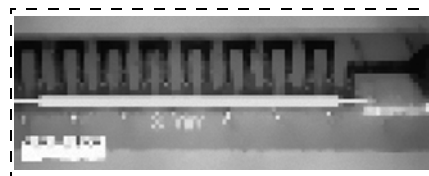


Рис. 20. Датчик крови

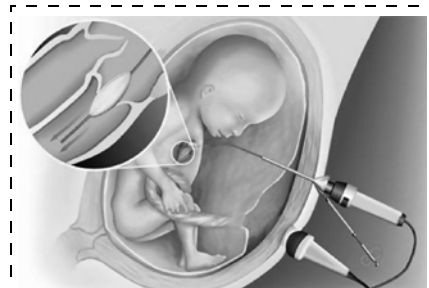


Рис. 21. Использование катетеров



Рис. 22. Схема операции

чтобы создавать новые изделия для хирургов. Такими изделиями являются датчики потока и УЗ датчики. Verimetra разрабатывает датчики скорости крови (рис. 20), которые встраиваются в наконечники сверхмалых катетеров. Используются термисторы. Множество термисторов расположены в наконечнике катетера, микросистема может считывать распределение скорости крови по кровеносному сосуду. Это важно знать для определения частичной закупорки артерии.

Компания работает по следующим медицинским направлениям: онкология; заболевания предсердия; управление сердечным ритмом. Verimetra разрабатывает датчики для катетеров, которые используются в предродовых хирургических операциях на сердце еще неродившегося ребенка (операции на сердце плода, рис. 21, 22).

Заключение

МЭМС обычно разделяют на две категории:

- устройства, которые обнаруживают информацию — микродатчики;
- устройства, которые могут ответить на информацию или какое-либо внешнее действие — актюаторы.

Микродатчики собирают информацию через тепловые, биологические, химические и оптические входы. Электроника микроустройств обрабатывает информацию и управляет действиями актюаторов, которые, в свою оче-

редь, что-то перемещают, фильтруют, всасывают, выталкивают. Их действия основаны на разработанной и предназначенной только для них команде.

Использование МЭМС — это существенная экономия средств. Изготовление обычной монтажной схемы из 800 компонентов стоит 30 долл. Применение МЭМС может устранить сразу 200 дискретных деталей, что даст экономии 8 долл. (это только на одну монтажную схему).

Преимущества МЭМС в радиосистемах:

- уменьшение полосы пропускания;

- увеличение мобильности;
- большее быстродействие;
- высокая надежность.

Применение МЭМС в волоконно-оптических сетях:

- переключатели;
- активные источники;
- перестраиваемые фильтры;
- переменные оптические аттенуаторы;
- устройства компенсации дисперсии.

Без МЭМС развитие оптических цепей шло медленно вследствие больших сложностей в интеграции оптики, механики и электроники.

УДК 681.586.325

А. И. Галушков, канд. техн. наук,
А. Н. Сауров, д-р техн. наук, проф.,
НПК "Технологический Центр" МИЭТ,
А. И. Погалов, д-р техн. наук, проф., МИЭТ

МОДЕЛИРОВАНИЕ, ДИНАМИЧЕСКИЙ И ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НАНОЭЛЕМЕНТОВ

Представлены принципы и методы моделирования инерциальных чувствительных наноэлементов. Проведены исследования, динамический и прочностной анализ. Установлены закономерности влияния на чувствительность и частотный рабочий диапазон геометрических размеров и инерционной массы наноэлемента.

Инерциальный наноэлемент (ИНЭ) является первичным измерительным преобразователем, который непосредственно воспринимает измеряемую физическую величину, в данном случае ускорение, и преобразует ее в выходной сигнал. Механическая система ИНЭ состоит из основания в виде рамки, внутри которой находится инерционная масса. Инерционная масса крепится к рамке с помощью подвески, состоящей из упругих балок. Балки располагают по консольной или мостовой схеме [1]. Ускоренное перемещение рамки вызывает смещение инерционной массы и деформацию упругих балок, что используется для получения полезного сигнала.

Консольная схема подвески инерционной массы характеризуется высокой основной чувствительностью. Однако недостатком этой схемы является нарушение соосности рамки и инерционной массы

при больших ее перемещениях и существенная поперечная чувствительность.

При мостовой схеме подвески инерционная масса перемещается строго вдоль измерительной оси. Многобалочная мостовая подвеска инерционной массы характеризуется низкой чувствительностью к поперечным воздействиям, высокой жесткостью и основной собственной частотой. Причем жесткость подвески увеличивается при растяжении балок в процессе колебаний.

Основная чувствительность ИНЭ снижается с увеличением числа балок подвески. Разумный компромисс для получения приемлемых значений основной чувствительности и собственной частоты является использование в подвеске четырех упругих балок. Типичные схемы подвески инерционной массы с использованием четырех упругих балок, представлены на рис. 1.

Пьезорезистивный ИНЭ представляет собой комбинированный датчик двойного преобразования инерционного принципа действия. Ускоренное движение основания вызывает смещение инерционной массы и деформацию балок первичного преобразователя. На балках сформированы твердотельные кремниевые пьезорезисторы, образующие простейший вторичный преобразователь — мостовую электрическую схему, которая преобразует деформацию балок в изменение сопротивления пьезорезисторов и в электрический сигнал.

Принцип действия тензорезисторов основан на изменении электрического сопротивления материала при его деформации. Эффективность преобразователей определяется коэффициентом тензочувствительности K , представляющим собой отношение относительного изменения сопротивления к относительной деформации: $K = \Delta R / (R \epsilon)$, где ϵ — относительная деформация тензорезистора. Относитель-

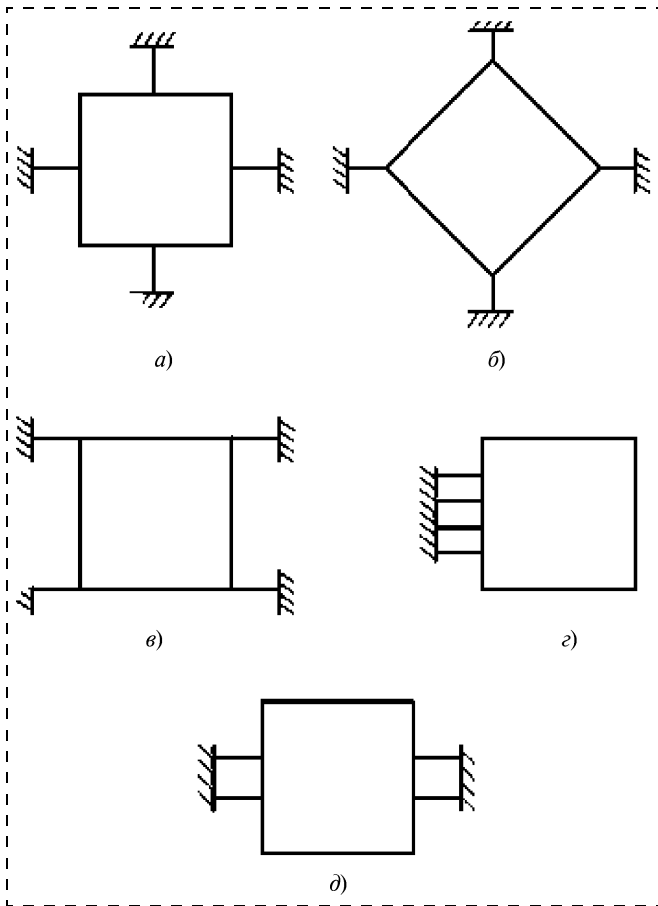


Рис. 1. Схемы подвески инерционной массы:

а — мостовая подвеска в форме креста с креплением за середину сторон инерционной массы; б — мостовая подвеска в форме креста с креплением за углы массы в направлении ее диагоналей; в — мостовая Н-образная подвеска с креплением за углы массы; г — консольная подвеска; д — мостовая Н-образная подвеска, балки установлены на равном расстоянии от угла и оси симметрии инерционной массы

ное изменение сопротивления тензорезистора определяют по формуле

$$\Delta R/R = (1 + 2\mu)\varepsilon + \Delta\rho/\rho,$$

где μ — коэффициент Пуассона; ρ — удельное сопротивление. Составляющая $(1 + 2\mu)\varepsilon$ зависит от изменения геометрических размеров (длины тензорезистора и площади сечения), составляющая $\Delta\rho/\rho$ — от изменения удельного сопротивления при деформации материала тензорезистора.

Сопротивление полупроводникового кремниевого тензорезистора при его деформации изменяется главным образом за счет изменения удельного сопротивления. Изменением геометрических размеров кремниевого тензорезистора можно пренебречь, поскольку $(1 + 2\mu)\varepsilon \ll \Delta\rho/\rho$. Таким образом, для полупроводникового тензорезистора зависимость удельного сопротивления имеет вид

$$\Delta\rho/\rho = \pi\sigma = \pi E\varepsilon,$$

где π — коэффициент пьезорезистивности; σ — напряжение тензорезистора; E — модуль упругости.

Коэффициент пьезорезистивности π зависит от следующих факторов:

- ориентации резистивных полосок;

- механического напряжения;
- типа кремния (p или n);
- концентрации примеси.

На практике принимают $K = \pi E$, коэффициент тензочувствительности достигает абсолютных значений от 100 до 200, а его знак определяется типом примесей (кремний p -типа — знак плюс, кремний n -типа — знак минус) [2].

Статическую чувствительность ИНЭ определяют по формуле

$$S_0 = S_1 S_2 = \left(\frac{\varepsilon}{a}\right) \left(\frac{U_{\text{вых}}}{\varepsilon}\right) = \left(\frac{\sigma}{Ea}\right) \left(\frac{U_M(\Delta R/R)}{\varepsilon}\right) = \left(\frac{\sigma}{Ea}\right) U_M K,$$

где S_1, S_2 — чувствительность первичного и вторичного преобразователей; $U_{\text{вых}}$ — напряжение выходного электрического сигнала; $R, \Delta R$ — сопротивление и изменение сопротивления тензорезистора; U_M — напряжение на мосте; K — коэффициент тензочувствительности; a — измеряемое ускорение.

При напряжении на мосте $U_M = 5000$ мВ, коэффициенте тензочувствительности $K = 150$ и действии ускорения $a = 1g$ с учетом модуля упругости кремния $E = 1,3 \cdot 10^5$ МПа статическую чувствительность определим по формуле

$$S_0 = \left(\frac{\sigma}{Ea}\right) U_M K = 5,8\sigma,$$

где σ измеряется в МПа, S_0 в мВ/г.

К инерциальным элементам предъявляют повышенные требования по прочностной и метрологической надежности. Под *прочностной надежностью* понимают функционирование устройства без отказов, вызванных разрушением, недопустимыми деформациями, изменением размеров и формы элементов, свойств материалов и электрофизических параметров. Под *метрологической надежностью* понимают способность сохранять достоверность измерений в пределах установленных норм при заданных условиях эксплуатации.

Прочностная и метрологическая надежность микросенсоров зависит от механических, динамических, демпфирующих свойств материалов, характера напряженно-деформированного состояния, эффективного использования прочности и жесткости материалов, совершенства методов расчета и проектирования, критериев надежности [3].

Основной мерой прочностной надежности является *запас прочности* элементов конструкции. Прочностную надежность можно оценивать и по вероятности безотказной работы.

Моделирование, динамический и прочностной анализ ИНЭ проводили с помощью метода конечного элемента [4].

При моделировании использовали следующие принципы и допущения:

- деформации в материалах — линейно-упругие, граничные условия не изменяются в процессе нагружения;
- для материалов используется модель сплошного, однородного, изотропного, деформируемого тела;

- на основе компонентов напряженно-деформированного состояния (НДС) и параметров прочности материалов вычисляются эквивалентные напряжения по критерию энергии формоизменения.

Коэффициент запаса прочности определяется как отношение допускаемого напряжения к максимально-му эквивалентному напряжению в пределах материала.

Исследовали влияние конструктивно-технологических параметров на основные эксплуатационные и метрологические характеристики для определения рациональной конструкции ИНЭ. Для решения этой задачи необходим анализ напряженно-деформированного состояния и динамических свойств моделей.

Основными метрологическими и эксплуатационными характеристиками ИНЭ являются следующие:

- нормируемое значение измеряемого ускорения;
- основная чувствительность;
- поперечная чувствительность;
- частотный рабочий диапазон;
- габаритно-массовые параметры.

Нормируемое значение измеряемого ускорения — значение ускорения, которое может быть измерено без необратимых изменений в ИНЭ.

Основная чувствительность — отношение приращения выходного напряжения к приращению входного ускорения. Вследствие различных допусков в процессе изготовления и колебаний в размерах микросенсоров ось основной чувствительности, как правило, не совпадает с осью максимальной чувствительности. Это обуславливает существование *поперечной чувствительности*, которую необходимо минимизировать.

Частотный рабочий диапазон определяется основной собственной частотой и демпфированием в системе, поэтому ИНЭ должен иметь одну собственную частоту и равномерную плоскую амплитудно-частотную характеристику, обеспечивающую получение точных измерений. Увеличение частотного рабочего диапазона и основной собственной частоты связано с уменьшением инерционной массы и повышением жесткости ее подвеса.

Жесткость упругой мостовой подвески из четырех балок определяют по формуле

$$k = \frac{48 EJ_x}{l^3} = \frac{4 E b h^3}{l^3},$$

где J_x — момент инерции поперечного сечения балки; b , h — ширина и высота поперечного сечения балки; l — длина балки.

Жесткость консольной подвески из четырех балок определяют по формуле

$$k = \frac{E b h^3}{l^3}.$$

Формулу для первой собственной частоты (в герцах) запишем в виде

$$f_1 \approx 0,16 \sqrt{\frac{k}{m}},$$

где m — инерционная масса.

Синусоидальное ускорение преобразуется без динамической погрешности δ_d только в ограниченном

диапазоне частот. Причем ее значение зависит от коэффициента демпфирования ξ и частоты вынужденных колебаний f :

$$\delta_d = \frac{1}{\sqrt{(1 - v^2)^2 + (2\xi v)^2}} - 1,$$

где $v = f/f_1$ — относительная частота; ξ — коэффициент демпфирования.

При низком демпфировании ($\xi < 0,02$) частотная характеристика системы на $1/5$ собственной частоты составляет 1,04. Это означает, что чувствительность ИНЭ на 4 % выше на этой частоте по сравнению с более низкими частотами. Поэтому равномерность частотной характеристики недемпфированных систем можно считать ограниченной $1/5$ собственной частоты.

Для расширения частотного рабочего диапазона и снижения уровня выходного сигнала при резонансе применяют *вязкое демпфирование*. При оптимальном демпфировании $\xi < 0,7$ частотная характеристика равномерна до частоты $f_1/3$ [5, 6].

Собственную частоту ИНЭ с поправкой на демпфирование определяют по формуле

$$f_d = f_1 \sqrt{1 - \xi^2}.$$

Для обеспечения требуемого частотного рабочего диапазона необходимо повышение основной собственной частоты, что достигается увеличением жесткости. Выполнение упругой балки с минимальной длиной позволяет в несколько раз и даже на порядок увеличивать частотный рабочий диапазон. Расширение частотного рабочего диапазона за счет уменьшения длины упругой балки способствует также получению требуемых габаритно-массовых характеристик. Чем меньше размеры балок упругой подвески, тем меньше могут быть размеры ИНЭ. С уменьшением массы ИНЭ ниже вероятность искажения им характеристик конструкции, к которой он прикреплен.

По конструктивно-технологическим требованиям типичная конструкция ИНЭ состоит из квадратной кремниевой подложки толщиной 460 мкм, рамки из оксида кремния толщиной 0,3 мкм и кремниевой рамки толщиной 0,2 мкм, к которой подвешена инерционная масса. Ширина рамок 200 мкм. Рамка из оксида кремния позволила сформировать под инерционной массой зазор 0,3 мкм для ее перемещения.

Эксплуатационные и метрологические требования к проектируемому ИНЭ следующие:

- нормируемое значение измеряемого ускорения ± 10 g;
- чувствительность не менее 0,5 мВ/g;
- собственная частота не менее 10000 Гц;
- перемещение инерционной массы не более 0,3 мкм.

Для обеспечения этих требований инерционная масса имела размер в плане 400×400 мкм, балки упругого подвеса имели размеры (длина $\times$ ширина $\times$ высота) сечения, равные $20 \times 10 \times 0,2$ мкм.

Варьируемые параметры моделей:

- схема подвески инерционной массы (пять исследуемых вариантов показаны на рис. 1);
- толщина инерционной массы 0,2 или 1,2 мкм;
- длина упругой балки подвески 20 или 40 мкм.

Таблица 1
Физико-механические свойства материалов

Материал	$\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	μ	ρ , мг/мм ³	$[\sigma]$, МПа
Кремний	2,8	1,3	0,3	2,3	200
Оксид кремния	0,6	0,75	0,17	3,5	100

Физико-механические свойства конструкционных материалов микросенсора представлены в табл. 1, где α — коэффициент температурного линейного расширения (ТКЛР); E — модуль упругости; μ — коэффициент Пуассона; ρ — плотность материала; $[\sigma]$ — допускаемые напряжения.

При проектировании ИНЭ необходимо обеспечить десятикратный запас по прочности. Поэтому в табл. 2 представлены основные характеристики моделей ИНЭ при действии ускорения $a = 100$ g в направлении измерительной оси перпендикулярно плоскости подложки. При моделировании определяли НДС инерциального элемента (эквивалентные, продольные и поперечные напряжения и перемещения) и динамические характеристики (собственные частоты и формы колебаний). Для повышения точности и эффективности моделирования использовали свойства симметрии геометрии и граничных условий. На всех рисунках представлена одна четверть модели.

Модель 1 (схема подвески — рис. 1, а). Эквивалентные напряжения σ_z в балке упругой подвески на фоне конечно-элементной модели показаны на рис. 2 (см. третью сторону обложки). Перемещения элементов модели представлено на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Модель 2 (схема подвески — рис. 1, б) На рис. 4 (см. третью сторону обложки) показаны продольные напряжения в балке, на рис. 5 (см. третью сторону обложки) представлены перемещения элементов модели.

Анализ основных характеристик моделей 1 и 2 (см. табл. 2) показывает, что подвеска инерционной массы в форме креста за середину сторон более жесткая, чем крестовая подвеска за углы. Перемещение массы у модели 1 составило 0,081 мкм, у модели 2 — 0,1 мкм. Собственные частоты модели 1 — первая 16,6 кГц, вторая — 21 кГц.

Повышенная податливость подвески у модели 2 обусловила снижение основной первой частоты до 13,3 кГц, вторая частота составила 25,4 кГц. Продольные напряжения в зоне расположения тензорезисторов у модели 1 на 16 % выше и составили 20 МПа, у модели 2 — 16,8 МПа. С учетом действующего ус-

корения $a = 100$ g статическую чувствительность определим по формуле

$$S_0 = 0,058\sigma.$$

Тогда чувствительность ИНЭ модели 1 составила $S_0 = 1,12$ мВ/g, у модели 2 — $S_0 = 0,98$ мВ/g.

Модель 3 (схема подвески — рис. 1, в). Жесткость такой подвески выше, чем у подвески в форме креста на 10...15 %. В этой модели использовали инерционную массу с толщиной 0,2 мкм, равной толщине упругих балок.

На рис. 6 (см. четвертую сторону обложки) показано распределение эквивалентных напряжений, на рис. 7 (см. четвертую сторону обложки) — перемещения элементов модели 3. Ступенчатое изменение цветов хорошо показывает, что деформация инерционной массы имеет мембранный характер. Стрела прогиба составила 2,3 мкм, что превышает проектируемый зазор под инерционной массой в 8 раз. Прогиб балок составил 0,2 мкм. Причем НДС балок неоднородно по ширине — перепад напряжений от 2 до 13,3 МПа. Собственная частота ИНЭ составляет 3,8 кГц. Модель 3 не удовлетворяет эксплуатационным и метрологическим требованиям, предъявляемым к ИНЭ с субмикрометровыми размерами.

Модель 4 (рис. 1, г). Здесь использована консольная схема подвески инерционной массы, которая характеризуется высокой основной чувствительностью. Инерционная масса ИНЭ была уменьшена в 4 раза по сравнению с моделями 1 и 2 за счет уменьшения размеров массы в плане до 200×200 мкм (толщина 1,2 мкм). Распределение эквивалентных напряжений в балке представлено на рис. 8 (см. четвертую сторону обложки). Продольные напряжения на балках в зоне расположения тензорезисторов составили 64 МПа, что обусловило высокую чувствительность 3,7 мВ/g. При действии поперечного ускорения 100 g эквивалентные напряжения в зоне тензорезисторов составили 0,27 МПа (при действии ускорения 100 g в направлении оси основной чувствительности $\sigma_z = 51$ МПа). Это соответствует поперечной чувствительности ~0,5 %. Высокая податливость консольной подвески обусловила прогиб балок 0,75 мкм и перемещение центра масс 6 мкм, что существенно превышает зазор между массой и подложкой, равный 0,3 мкм. Высокая податливость порождает низкие собственные частоты модели 4 — первая 1,63 кГц, вторая 30,8 кГц. Видно, что консольная схема подвески инерционной массы по эксплуатационным и метрологическим требованиям также неприемлема.

Результаты исследования моделей 1—4 позволяют сделать следующие выводы. Инерционная масса долж-

Основные характеристик моделей микросенсоров

Модель	Схемы подвеса (см. рис. 1)	Размеры массы, мкм	Размеры балки, мкм	Перемещение массы, мкм	σ_y , МПа	σ_x , МПа	σ_z , МПа	f_1 , кГц	S_0 , мВ/g
1	а	$400 \times 400 \times 1,2$	$20 \times 10 \times 0,2$	0,081	20	10	15	16,6	1,12
2	б	$400 \times 400 \times 1,2$	$20 \times 10 \times 0,2$	0,1	16,8	7	16,8	13,3	0,98
3	в	$400 \times 400 \times 0,2$	$20 \times 10 \times 0,2$	2,3	13,3	6	11,9	3,8	0,77
4	г	$200 \times 200 \times 1,2$	$20 \times 10 \times 0,2$	6,0	64	29	51	1,63	3,7
5	д	$200 \times 200 \times 1,2$	$40 \times 10 \times 0,2$	0,17	9,4	3,3	8,1	12,3	0,54

Таблица 2

на быть с размерами в плане не более 200×200 мкм и толщиной 1,2 мкм. Необходимо использовать Н-образную схему подвески инерционной массы, где балки установлены на равном расстоянии от угла и оси симметрии (см. рис. 1, д). Это позволяет существенно уменьшить стрелу прогиба инерционной массы. Для повышения чувствительности длину балок подвески необходимо увеличить с 20 до 40 мкм.

С учетом этих рекомендаций разработана базовая модель 5 инерциального наноэлемента (см. табл. 2). Основные характеристики НДС и динамических свойств модели 5 представлены на рис. 9 (см. четвертую сторону обложки).

Результаты исследований показали, что прогиб балок подвески и центра масс ИНЭ одинаков и составил 0,17 мкм. Напряжения в зоне расположения тензорезисторов составили 9,4 МПа, что соответствует чувствительности 0,54 мВ/г. Основная собственная частота ИНЭ 12,3 кГц. Вторая собственная частота существенно выше и равна 192 кГц. ИНЭ имеет одну степень свободы и хорошие эксплуатационные и метрологические характеристики.

Установлено, что с повышением жесткости подвески (увеличение размеров сечения и уменьшение длины балки) чувствительность понижается, а собственная частота возрастает. ИНЭ с широким частотным диапазоном не может иметь высокую чувствительность. Для повышения чувствительности микросенсора можно увеличить размеры и инерционную массу, однако это также приведет к снижению

динамических характеристик. Для обоснованного нахождения соотношений между чувствительностью и основной собственной частотой ИНЭ используют метрологическую характеристику — *информативность*, которую определяют по формуле [7]

$$B = S f_1^2.$$

Обеспечение максимальной информативности достигается за счет разумного компромисса между значениями чувствительности и основной собственной частоты.

Список литературы

1. Погалов А. И., Панкратов О. В. Микроэлектронные пьезорезистивные акселерометры // Изв. вузов. Электроника. 2000. № 2. С. 95—102.
2. Тищенко О. Ф., Киселев Л. Т., Коваленко А. П. и др. Элементы приборных устройств: Учеб. пособие. В 2-х ч. Ч. 2. Приводы, преобразователи, исполнительные устройства / Под ред. О. Ф. Тищенко. М.: Высш. школа, 1982. 263 с.
3. Погалов А. И. Обеспечение механической устойчивости радиоэлектронных средств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 1997. Вып. 1. С. 20—23.
4. Алямовский А. А. Solid Works / COSMOS Works. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК Пресс, 2004. 432 с.
5. Аш Ж. Датчики измерительных систем. Кн. 1. М.: Мир, 1992. 480 с.
6. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение, 1981. Т. 5. Измерения и испытания / Под ред. М. Д. Генкина. 1981. 496 с.
7. Тихонов А. И. Принцип совмещения функций в датчиках механических величин // Приборы и системы управления. 1996. № 1. С. 18—21.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 537.228

С. А. Гриднев, д-р физ.-мат. наук,
А. Г. Горшков, А. В. Ситников, канд. физ.-мат. наук,
Н. В. Самалюк,
Воронежский государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ АМОРФНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ МЕТАЛЛ — СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК

Исследована кинетика изотермической кристаллизации аморфных образцов нанокмпозитов $\text{Co}_x[\text{Pb}_{0,81}\text{Sr}_{0,04}(\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5})_{0,15}(\text{Zr}_{0,575}\text{Ti}_{0,425})\text{O}_3]_{100-x}$ разного состава в присутствии переменного электрического поля. Установлено, что с увеличением напряженности электрического поля скорость кристаллизации возрастает из-за увеличения диффузионной подвижности атомов. В то же время не было обнаружено какого-либо влияния частоты электрического поля на процесс кристаллизации изученных аморфных нанокмпозитов.

Введение

В последние годы большой интерес ученых вызывает изучение различных наногетерогенных структур, в состав которых входят ферромагнитная и сегнетоэлектрическая фазы [1—5]. Эти композиционные материалы обладают уникальными физическими свойствами, отсутствующими у составляющих их компонентов.

Поскольку наиболее распространенным способом получения таких тонкопленочных композитов является напыление исходных материалов на подложку, полученные пленки находятся в аморфном состоянии, т. е. в термодинамически нестабильном либо метастабильном состоянии. Переход в равновесное кристаллическое состояние приводит к существенному изменению всех свойств. Именно поэтому изучению кинетики кристаллизации аморфных материалов посвящено большое число работ [6—10], и к настоящему времени общие закономерности кристаллизации в основном установлены [11—13]. В то же время многие вопросы, в частности, влияние на кристаллизацию состава композита, а также по-

лей различной природы (электрических, магнитных, механических) остаются невыясненными.

Целью настоящей работы было изучение процесса кристаллизации аморфных нанокомпозитов $\text{Co}_x[\text{Pb}_{0,81}\text{Sr}_{0,04}(\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5})_{0,15}(\text{Zr}_{0,575}\text{Ti}_{0,425})\text{O}_3]_{100-x}$, далее $\text{Co}_x(\text{ЦТС})_{100-x}$, в зависимости от состава композита, а также от напряженности и частоты переменного электрического поля.

Методика эксперимента

Нанокомпозиты $\text{Co}_x(\text{ЦТС})_{100-x}$ в виде тонких пленок были получены в смешанной атмосфере (аргон + кислород) методом ионно-лучевого распыления мишеней на ситалловые подложки [14]. Парциальное давление кислорода в процессе распыления составляло $5,2 \cdot 10^{-3}$ Па, а парциальное давление аргона — $8 \cdot 10^{-2}$ Па. Неравномерное расположение керамических пластин ЦТС на поверхности кобальтовой мишени позволило в одном напылительном цикле и, соответственно, при одних условиях получить образцы, в которых соотношение долей металлической и диэлектрической фаз изменяется в интервале 0–75 ат. %. Порог перколяции в изученной системе составляет $x_{\text{п}} = 28$ ат. %. Это означает, что в образцах с $x < x_{\text{п}}$ основное влияние на свойства композита оказывает сегнетоэлектрическая фаза, а при $x > x_{\text{п}}$ — металлическая фаза. Электронно-микроскопическое исследование показало, что полученные образцы имеют гранулярную структуру со средним размером гранул Co около 10 нм.

Электрические контакты к образцам композитов осуществлялись через нижний многослойный металлический электрод и верхние контактные площадки, для чего на ситалловую подложку напылялись слои металлов (Cr, Cu, Cr), затем осаждался собственно композиционный материал, на поверхности которого формировались контактные площадки осаждением слоев металлов (Cr, Cu, Cr) через специальную маску. Слои хрома осаждались для улучшения адгезии пленки композита, предотвращения окисления меди и получения омических контактов.

В экспериментах кристаллизацию обычно изучают в процессе изотермического отжига, при котором аморфный образец выдерживается при постоянной достаточно высокой температуре (выше, чем температура стеклования) и измеряется изменение во времени какого-либо структурно-чувствительного параметра, отражающего изменение объемной доли кристаллизованного вещества [5, 12, 13]. В настоящей работе в качестве такого параметра была выбрана электропроводность σ , которая изменяется на несколько порядков величины при переходе образцов из аморфного состояния в кристаллическое.

Измерения электропроводности σ на постоянном токе в полученных композитах проводились тераометром типа Е6-13А на образцах толщиной ~1 мкм и площадью 6×6 мм.

Относительный объем кристаллической фазы $V_{\text{кр}}$ в процессе кристаллизации аморфного образца для

любого момента времени определялся из следующего соотношения:

$$V_{\text{кр}} = \frac{\sigma_{\text{к}}[\sigma(t) - \sigma_{\text{н}}]}{\sigma(t)[\sigma_{\text{к}} - \sigma_{\text{н}}]}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{н}}$ и $\sigma_{\text{к}}$ — начальная и конечная электрическая проводимость для аморфного и кристаллизованного образца соответственно; $\sigma(t)$ — проводимость в момент времени t .

Результаты эксперимента и обсуждение

Кинетику кристаллизации аморфных образцов $\text{Co}_x(\text{ЦТС})_{100-x}$ с $x = 0$; 23 и 36 ат. % изучали путем измерения временных зависимостей σ при температуре 290 °С, близкой к температуре кристаллизации ($T_{\text{кр}} = 318$ °С), определенной по данным дифференциально-термического анализа. Кривые $V_{\text{кр}}(t)$, рассчитанные по формуле (1) для образцов нанокомпозита разного состава с использованием экспериментальных зависимостей $\sigma(t)$, представлены на рис. 1. На полученных кривых можно выделить два участка. Первый участок характеризуется быстрым изменением $V_{\text{кр}}$ за короткий интервал времени отжига.

Это означает, что атомы перемещаются ближе к равновесным положениям и атомная система перестраивается от неупорядоченного аморфного состояния к хорошо упорядоченному кристаллическому состоянию, т. е. кристаллизация происходит в основном за это время. Интересно отметить, что на кривых наблюдаются перегибы и другие отклонения от монотонного хода, свидетельствующие о многостадийности процесса кристаллизации в сложной неоднородной системе.

Второй участок кривых $V_{\text{кр}}(t)$ характеризуется медленным приближением к насыщению и может быть связан с укрупнением объемов кристаллических фаз. Таким образом, для первого участка характерно возникновение зародышей кристаллической фазы в аморфной матрице и их рост, а для второго участка — разрастание уже имеющихся кристаллических областей.

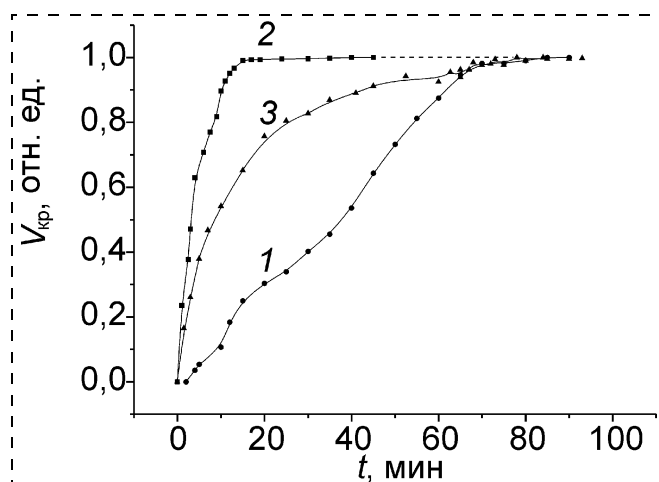


Рис. 1. Зависимость объема кристаллической фазы от времени изотермического отжига при 290 °С в образцах композита $\text{Co}_x(\text{ЦТС})_{100-x}$ с разной концентрацией x : 0 (1), 23 (2) и 36 (3)

Кинетику процесса кристаллизации удобно характеризовать скоростью кристаллизации $v = \Delta V_{\text{кр}}/\Delta t$. Для композитов с составом до порога перколяции v возрастает от 0,014 до 0,06 мин⁻¹, когда x увеличивается от 0 до 23 ат. %. Полученная зависимость может быть связана с тем, что объем аморфной фазы в образцах становится меньше с ростом x (кривые 1 и 2 на рис. 1), в результате чего процесс кристаллизации происходит за меньшее время. Кривая 3 на рис. 1 получена для композита с составом за порогом перколяции, когда основное влияние на свойство композита оказывает металлическая фаза. В полученных композитах Co находится в кристаллическом состоянии. За порогом перколяции включения аморфной сегнетоэлектрической фазы занимают небольшие области в металлической матрице. В процессе измерения напряжение, подаваемое на образец, создает большие поля, действующие на эти области. В итоге скорость кристаллизации для $x = 36$ ат. % (кривая 3) будет больше, чем для чистого образца ЦТС (кривая 1 на рис. 1).

Влияние напряженности переменного электрического поля E_0 на зависимость $V_{\text{кр}}(t)$ для образца с $x = 0$ ат. % представлено на рис. 2. Из сравнения полученных кривых видно, что качественно вид кривых остается таким же, как и в отсутствие внешнего поля: на них наблюдаются два участка, соответствующие быстрому и медленному изменению $V_{\text{кр}}$ со временем. Однако с увеличением переменного электрического поля E_0 образование кристаллической фазы происходит за более короткий интервал времени, т. е. скорость кристаллизации v увеличивается от 0,013 до 0,033 мин⁻¹ с ростом напряженности электрического поля E_0 от 0 до $5 \cdot 10^5$ В/м. При неизменной напряженности поля E_0 влияние частоты переменного поля на скорость кристаллизации является незначительным (рис. 3), а скорость кристаллизации остается постоянной при изменении частоты от 100 до 1000 Гц и составляет 0,033 мин⁻¹.

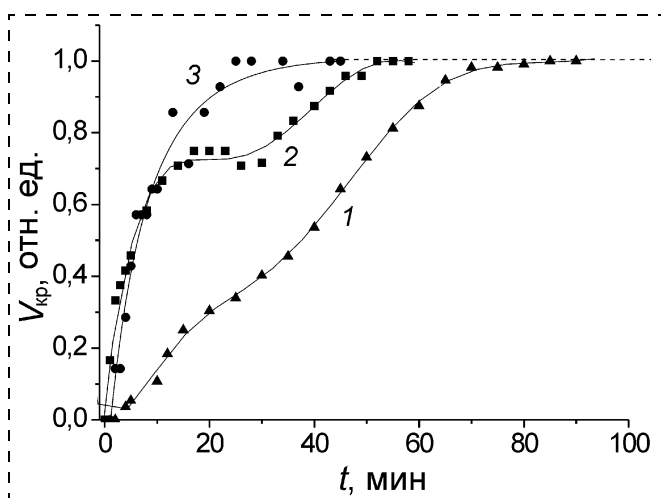


Рис. 2. Зависимость объема кристаллической фазы от времени изотермического отжига при 290 °С для образца $\text{Co}_x(\text{ЦТС})_{100-x}$ с $x = 0$ при разной напряженности приложенного поля E_0 , В·м⁻¹: 0 (1), $2 \cdot 10^5$ (2) и $5 \cdot 10^5$ (3). Частота 100 Гц

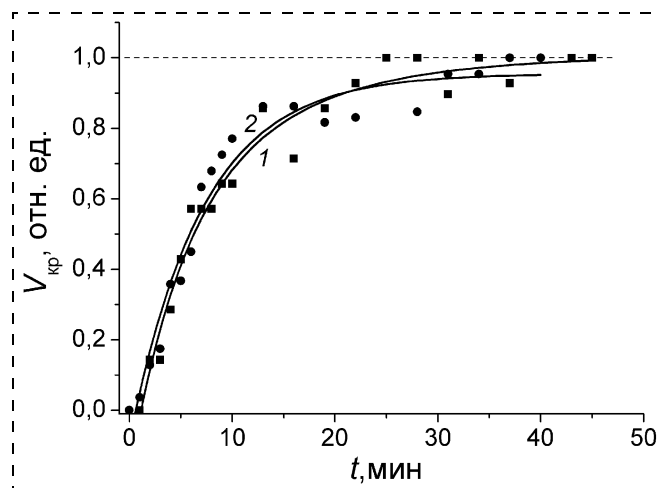


Рис. 3. Зависимость объема кристаллической фазы от времени изотермического отжига для образца $\text{Co}_x(\text{ЦТС})_{100-x}$ с $x = 0$ при разной частоте внешнего поля: 1000 Гц (1) и 100 Гц (2). Напряженность поля $5 \cdot 10^5$ В·м⁻¹

Влияние напряженности электрического поля на скорость кристаллизации можно понять исходя из следующих соображений. Известно, что процесс кристаллизации аморфных веществ состоит из двух элементарных процессов: образования зародышей кристаллической фазы и роста кристаллической фазы. Поэтому кинетика процесса кристаллизации определяется скоростью образования зародышей и скоростью их разрастания.

Согласно [15], объемная доля кристаллизованного вещества выражается следующим соотношением:

$$V_{\text{кр}} = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{3} V_{\text{зар}} m^3 t^4\right), \quad (2)$$

где $V_{\text{зар}}$ — скорость образования кристаллических зародышей; m — скорость роста кристаллической фазы; t — время. Из уравнения (2) нетрудно увидеть, что объемная доля кристаллической фазы сильно зависит от скорости зародышеобразования и скорости роста кристаллической фазы. Естественно предположить, что рост кристаллической фазы определяется диффузионной перестройкой атомов, которая, в свою очередь, зависит от наличия и величины электрического поля.

Согласно диффузионной теории, коэффициент диффузии атомов D в присутствии электрического поля определяется выражением [16]

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_0 - (1/2)E_0 l q}{RT}\right), \quad (3)$$

где D_0 — константа; R — универсальная газовая постоянная; T — температура; Q_0 — энергия активации миграции атомов в отсутствие электрического поля; E_0 — напряженность электрического поля; l — расстояние между двумя потенциальными ямами; q — заряд иона.

Из уравнения (3) видно, что электрическое поле способствует диффузии атомов и увеличивает их подвижность. Высокая атомная подвижность приводит к большей скорости роста кристаллов в течение процесса кристаллизации, что находится в согласии с экспериментом.

Скорость образования зародышей $V_{\text{зар}}$ сложным образом зависит от электрического поля. С одной стороны, поле E_0 уменьшает энергию активации миграции атомов и, следовательно, приводит к увеличению скорости зародышеобразования, а с другой — поле E_0 увеличивает энергию образца и делает невыгодным образование зародышей. При значениях напряженности поля E_0 , используемых в эксперименте, большее влияние оказывает первая причина, поэтому $V_{\text{зар}}$, так же как и m , увеличивается с ростом E_0 , что приводит к увеличению скорости кристаллизации.

Известно, что кинетика процесса фазового превращения, когда образуется только одна новая фаза, достаточно хорошо описывается уравнениями Колмогорова или Джонсона—Мэла—Аврами [11]. Поэтому, пользуясь результатами электрических измерений, можно анализировать кинетику изотермического перехода аморфных материалов к кристаллическому состоянию.

В случае постоянной скорости зарождения и последующего роста зародышей в форме плоского слоя объемная доля новой фазы в зависимости от времени при кристаллизации аморфного вещества описывается выражением [17, 18]

$$V_{\text{кр}} = 1 - \exp[-(t/\tau)^n], \quad (4)$$

где $V_{\text{кр}}$ — доля закристаллизованного материала за время t ; n — размерность пространства; τ — время релаксации.

Уравнение (4) было получено для условия, что зародыши новой фазы равномерно распределены по объему и что скорость роста зависит от температуры.

Для того чтобы определить размерность зародышей n , построим представленные на рис. 1 экспериментальные данные $V_{\text{кр}}(t)$ в координатах $\ln(-\ln V_{\text{кр}})$ от $\ln t$. Видно, что экспериментальные точки достаточно хорошо укладываются на прямые линии (рис. 4). По наклону прямых можно легко определить показатель степени Аврамы n для разных составов $\text{Co}_x(\text{ЦТС})_{100-x}$.

Для участка быстрого изменения $V_{\text{кр}}(t)$ в отсутствие внешнего электрического поля параметр n имеет значения 1,38; 1,03 и 0,76 для составов с $x = 0$; 23 и 36 ат. % соответственно, т. е. с увеличением x пока-

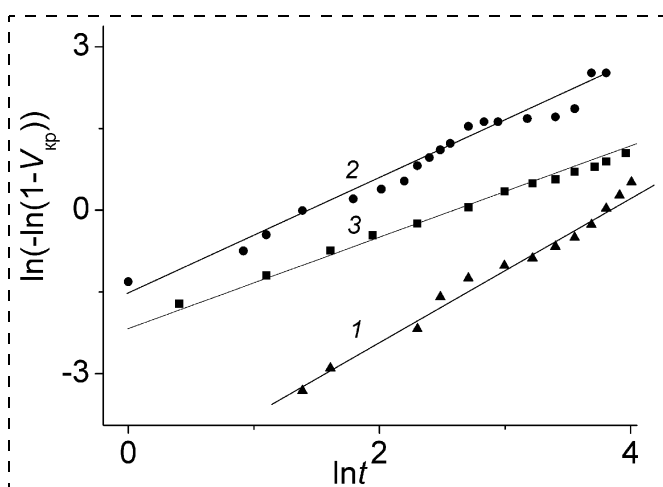


Рис. 4. Зависимость $\ln(-\ln V_{\text{кр}})$ от $\ln t$ для данных, приведенных на рис. 1

затель n уменьшается. Для второй области показатель n принимает значения 2,67 и 3,15 для составов $x = 0$ и 36 ат. % соответственно (рис. 4). Дробная величина показателя n , по-видимому, говорит о фрактальной природе зародышей кристаллической фазы.

Таким образом, значения n , полученные в условиях нашего эксперимента, согласно [11], свидетельствуют о том, что при выбранной температуре изотермического отжига на начальном этапе процесса кристаллизации происходит одномерный рост зародышей ($n = 0,76 \div 1,38$), т. е. зародышей в виде игл и удлинённых пластинок. Затем с увеличением времени кристаллизации происходит переход к росту объемных зародышей ($n = 2,67 \div 3,15$).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-02-0228) и CRDF (грант PG 05-010-1).

Список литературы

1. Zhai J., Cai N., Shi Z., Lin Y., Nan C-W. Magnetic-dielectric properties of $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{PZT}$ particulate composites // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. V. 37. P. 823–827.
2. Ren G. M., Yuan S. L., Yu G. Q. et al. Effect of sintering temperature on electrical transport in $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3/\text{BaTiO}_8$ composites // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. P. 4867–4871.
3. Devan R. S., Deshpande S. B., Chougule B. K. Ferroelectric and ferromagnetic properties of $(x)\text{BaTiO}_3 + (1-x)\text{Ni}_{0,94}\text{Co}_{0,01}\text{Cu}_{0,05}\text{Fe}_2\text{O}_4$ composite // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. 1864–1868.
4. Гриднев С. А., Горшков А. Г., Ситников А. В., Калинин Ю. Е. Перенос заряда и диэлектрические свойства гранулированных нанокомпозитов $\text{Co}_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ // ФТТ. 2006. Т. 48. Вып. 6. С. 1115–1117.
5. Гриднев С. А., Горшков А. Г., Ситников А. В., Копытин М. Н., Стогней О. В. Электрические и диэлектрические свойства тонкопленочных наногетерогенных структур $\text{Co}-\text{LiNbO}_3$ // Изв. РАН. Сер. Физика. 2006. Т. 70. № 8. С. 1130–1133.
6. Bao D., Yao X., Shinozaki K. and Mizutani N. Crystallization and optical properties of sol-gel-derived PbTiO_3 thin films // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. V. 38. P. 2141–2145.
7. Abd-Eltrahman M. I. Crystallization kinetics of $\text{Ge}_{17,5}\text{Te}_{82,5}$ chalcogenide glass // Phys. Stat. Sol. (a). 2003. V. 198. № 1. P. 49–55.
8. Saxena M. A crystallization study of amorphous $\text{Te}_x(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_{1-x}$ alloys with variation of the Se content // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. 460–463.
9. Gridnev S. A., Repnikov N. I. Kinetics of isothermal crystallization of amorphous PbTiO_3 // Ferroelectrics. 2004. V. 298. P. 107–112.
10. Гриднев С. А., Репников Н. И. Изучение процесса кристаллизации аморфного PbTiO_3 // Изв. РАН. Сер. Физика. 2004. Т. 68. № 7. С. 969–972.
11. Кристиан Дж. У. Фазовые превращения // Физическое металловедение / Под ред. Р. Кана. Вып. 2. М.: Мир, 1968. С. 227.
12. Метастабильные и неравновесные сплавы / Под ред. Ю. В. Ефимова. М.: Металлургия, 1988.
13. Глезер А. М., Молотиллов Б. В. Структура и механические свойства аморфных сплавов. М.: Металлургия, 1992.
14. Калинин Ю. Е., Королев К. Г., Ситников А. В. Электрические свойства многослойных металл-полупроводник с аморфной структурой // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. № 6. С. 61–67.
15. Hilling W. B., Turnbull D. Theory of Crystal Growth in Undercooled Pure Liquids // J. Chem. Phys. 1956. V. 24. P. 914.
16. Tang J., Li S., Mao X. and Du Y. Effect of electric field on the crystallization process of amorphous $\text{Fe}_{86}\text{Zr}_7\text{B}_6\text{Cu}_1$ alloy // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. 729–732.
17. Алексеечкин Н. В. О вычислении объемных долей конкурирующих фаз // Физика твердого тела. 2000. Т. 42. Вып. 7. С. 1316–1321.
18. Алексеечкин Н. В. К теории фазовых превращений с неоднородной скоростью зарождения // Физика твердого тела. 2000. Т. 42. Вып. 12. С. 2205–2212.

М. К. Марахтанов, д-р техн. наук,
Д. В. Духопельников, канд. техн. наук,
 МГТУ им. Н. Э. Баумана,
Мэй Сянь Сю, канд. техн. наук, доц.,
 Даляньский политехнический университет, КНР

ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлены значения оптических коэффициентов пропускания T , отражения R и поглощения A , измеренные для тонких пленок из меди, алюминия и титана при их взаимодействии с излучением видимого диапазона. Приводятся также коэффициенты электропроводности σ , измеренные для тех же пленок. Исследовано изменение названных коэффициентов в зависимости от толщины пленки и длины волны падающего излучения (дисперсионные характеристики). Установлена закономерность, согласно которой оптические коэффициенты перестают зависеть от толщины пленки, если последняя превысит значение, равное длине свободного пробега электрона в алюминии и меди. Отступление от данной закономерности, возникающее в титановых пленках, позволило уточнить способ определения концентрации электронов проводимости в титане.

Вакуумно-плазменная технология широко используется для нанесения тонких пленок. Производство такой продукции, как архитектурное стекло с энергосберегающим покрытием [1], компакт-диски (CD) или LCD-мониторы [2], требует массового изготовления прозрачных электропроводящих покрытий. Поэтому экспериментальные данные о коэффициентах пропускания T , отражения R , поглощения A и электропроводности σ , полученные для тонких металлических пленок, будут полезны в промышленности. Известно, что дисперсионные характеристики таких пленок тесно связаны с их структурой [3]. Если толщина пленки составляет несколько нанометров, т. е. намного меньше длины свободного пробега электрона в металле, то материал подобной пленки взаимодействует с падающим излучением иначе, чем массивный металл. Особенность этого взаимодействия связана с наноструктурой пленки, и его суть состоит в том, что тонкая пленка становится двумерным пространством по отношению к свободным электронам, движущимся внутри нее [4].

Исследованные пленки были получены в стандартной установке вакуумного напыления УВН 70 А1. Они наносились на стеклянные подложки методом магнетронного распыления. Выполненные из обычного оконного стекла 24 подложки или 24 образца имели толщину 4 мм и размер $S = 100 \times 100$ мм. Перед установкой в вакуумную камеру стекло промывалось водой в ультразвуковой ванне. Перед нанесением пленки поверхность стекла в вакуумной камере очищалась пучком ионов аргона, сформированного в ускорителе типа "Радиал" [5] с азимутальным дрейфом

электронов (напряжение, ускоряющее ионный пучок 1000 В, сила тока ионного пучка 0,08 А, внешний диаметр пучка около 140 мм). Время ионной очистки составляло 5 мин, давление в камере — $6 \cdot 10^{-2}$ Па. Расстояние от среза ускорителя до подложки 300 мм.

Для нанесения пленок применяли магнетрон постоянного тока с тремя сменными катодами. Диаметр каждого катода равнялся 105 мм. Расстояние между подложкой и катодом составляло 380 мм. Использовались катоды из меди М1 (содержание меди не менее 99,90 %), из дюралюминия Д16 (содержание алюминия не менее 90,8 %) и из титана ВТ1 (содержание титана не менее 98,6 %). При нанесении пленок из меди и алюминия на все образцы напряжение и сила тока разряда магнетрона сохранялись неизменными и составляли $V = 600$ В и $I = 3$ А соответственно. Средняя плотность тока на распыляемой поверхности катода магнетрона $j \approx 390 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$. Давление плазмообразующего газа — аргона $P = 9 \cdot 10^{-2}$ Па. При нанесении титановых пленок напряжение и сила тока разряда составляли $V = 510$ В, $I = 4$ А соответственно, а плотность тока на катоде $j \approx 520 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$.

Неравномерность толщины пленки изменялась слабо и не превышала ± 2 % на площади S каждого образца. Толщина пленки измерялась с помощью профилометра, модель 170622, тип 2, изготовитель "Калибр" (Россия). Точность измерения $\pm 1,5$ %. Для уменьшения ошибки измерения максимальную толщину определяли у самой толстой пленки на трех образцах с тремя различными металлами. Толщину пленки на остальных образцах считали пропорциональной времени ее нанесения с помощью магнетрона (табл. 1).

Коэффициенты пропускания T и отражения R измерялись с помощью акустооптического спектрофотометра АОС-3SL, изготовитель — "НИИ "Полюс" (Россия). Точность измерения обоих коэффициентов одинаковая и составляет ± 1 %. Обычно коэффициент поглощения считают равным

$$A = 1 - T - R. \quad (1)$$

Если исследуемая пленка нанесена на светоотражающую подложку, каковой в нашем случае является стекло, то следует учитывать собственный коэффициент отражения стекла от противоположной поверхности кромки, равный $R_c = 0,04$. Тогда уравнение (1) примет вид

$$A = 1 - R - T/(1 - R_c) = 1 - R - T/(1 - 0,04) = 1 - R - T/0,96. \quad (2)$$

Для проверки состоятельности уравнения (2) был проделан следующий эксперимент. Когда измеряли коэффициент отражения R пленки на образце № А1 010 (алюминиевая пленка толщиной 7 нм, см. табл. 1), капля вакуумного масла ВМ-1 была нанесена на сторону подложки, обратную пленке. Масло должно было снизить влияние обратной поверхности стекла на величину R , измеренную спектрофотометром. Как показал эксперимент (рис. 1), масло действительно снизило коэффициент отражения системы "пленка—стекло—масло" до величины R_m по сравнению с величиной R системы без масла. Снижение составило около 2 %. Поэтому значения коэффициентов поглощения A были подсчитаны по уравнению (2) для всех пленок, показанных на рис. 2—4.

Толщина металлических пленок в зависимости от времени их нанесения на стеклянную подложку

№ образца с медной пленкой Время нанесения t , с Толщина пленки h , нм	Cu300 300 250	Cu150 150 125	Cu075 75 60	Cu045 45 37	Cu030 30 25	Cu020 20 17	Cu010 10 8		
№ образца с алюминиевой пленкой Время нанесения t , с Толщина пленки h , нм	Al240 240 176	Al120 120 88	Al060 60 44	Al040 40 30	Al030 30 22	Al020 20 13	Al015 15 11	Al010 10 7	Al005 5 3
№ образца с титановой пленкой Время нанесения t , с Толщина пленки h , нм	Ti480 480 154	Ti240 240 77	Ti120 120 40	Ti060 60 20	Ti045 45 14	Ti030 30 10	Ti020 20 6	Ti010 10 3	

На заключительном этапе работы было измерено электрическое сопротивление r 21-го образца. Не исследовались три образца с самыми тонкими пленками каждого из трех металлов. Методика измерения состояла в следующем. От каждого образца из меди и алюминия была отрезана полоска размером 50 мм (L_1) $\times$ 15 мм (L_2). Для образцов из титана отрезалась полоска размером 20 мм (L_3) $\times$ 15 мм (L_2). Точность размеров ± 2 %. Электрическое сопротивление r соответствующей пленки измерялось вдоль стороны L_1 с помощью мультиметра Keithley, модель 2000 (США), точность измерения сопротивления $\pm 0,003$ %. Коэффициент электропроводности для меди и алюминия вычислялся по формуле

$$\sigma = \frac{L_1}{rS} = \frac{L_1}{rhL_2} = \frac{50}{rh15} = \frac{3,33}{rh}, \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}, \quad (3)$$

а для титана по формуле

$$\sigma = \frac{L_3}{rS} = \frac{L_3}{rhL_2} = \frac{20}{rh15} = \frac{1,33}{rh}, \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}, \quad (4)$$

где h — толщина пленки (см. табл. 1).

Результаты экспериментальных исследований приводятся ниже в форме таблиц и графиков. На рис. 2—4 показаны графики изменения оптических коэффициентов: пропускания T и отражения R в зависимости от толщины h металлической пленки.

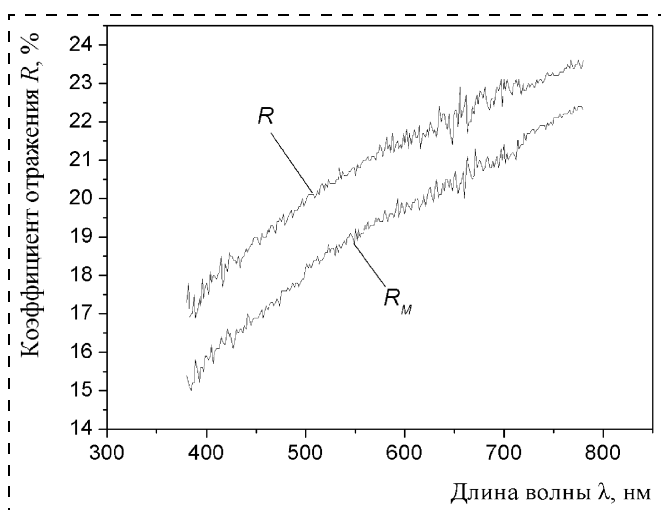


Рис. 1. Изменение коэффициента отражения R алюминиевой пленки толщиной 7 нм в зависимости от длины волны падающего излучения (образец № Al 010); R — стеклянная подложка без масла; R_M — капля масла нанесена на тыльную сторону подложки

Точки, соответствующие данным коэффициентам, измерены экспериментально. Третий оптический коэффициент — коэффициент поглощения A — также показан в виде графиков. Точки $A(h)$ на этих графиках были вычислены по уравнению (2) для экспериментально измеренных T и R при соответствующей толщине пленки. Графики разделены на четыре группы. Каждой группе соответствует определенная длина волны падающего излучения λ , для которой производились измерения T и R . Это длины волн: $\lambda_1 = 400$ нм; $\lambda_2 = 500$ нм; $\lambda_3 = 600$ нм и $\lambda_4 = 700$ нм, которые охватывают видимый диапазон спектра излучения. Последнее позволяет называть совокупность данных графиков дисперсионными характеристиками металлических пленок в видимом излучении.

Сравнивая дисперсионные характеристики различных металлических пленок, показанных на рис. 2—4, можно заметить, что оба измеренных коэффициента $T(h)$ и $R(h)$ перестают изменяться с увеличением толщины пленки h выше некоторого критического значения h_k . Это наступает при толщине $h \geq h_k$ (рис. 5). Здесь они достигают своих минимального $T_{\min}$ и максимального $R_{\max}$ значений. При этом обе предельные величины продолжают изменяться в зависимости от длины волны λ падающего излучения. Если пленка тоньше, чем h_k , то при некоторой толщине h_t наступает равенство двух оптических коэффициентов, присущих данной пленке $T(h, \lambda)$ и $R(h, \lambda)$.

Таблица 2

Результаты измерений критической толщины тонких пленок из меди, алюминия и титана; при толщине пленки h_t выполняется равенство коэффициентов отражения R и пропускания T ; длина волны падающего излучения равна 400, 500, 600, 700 нм (см. 1-й столбец)

Металл, длина волны, нм	h_k , нм	h_{kc} , нм	h_t , нм	h_{tc} , нм	$f = h_t/h_k$	$f_c = h_{tc}/h_{kc}$
Cu400 Cu500 Cu600 Cu700	30,76 30,76 33,46 26,92	30,47	15,18 15,10 16,45 11,75	14,62	0,51 0,49 0,49 0,44	0,48
Al400 Al500 Al600 Al700	17,80 15,34 14,25 14,50	15,47	11,20 10,13 9,50 8,56	9,90	0,63 0,66 0,67 0,59	0,64
Ti400 Ti500 Ti600 Ti700	20,00 20,00 22,35 23,06	21,35	14,60 13,78 13,73 13,64	13,87	0,73 0,69 0,61 0,59	0,65

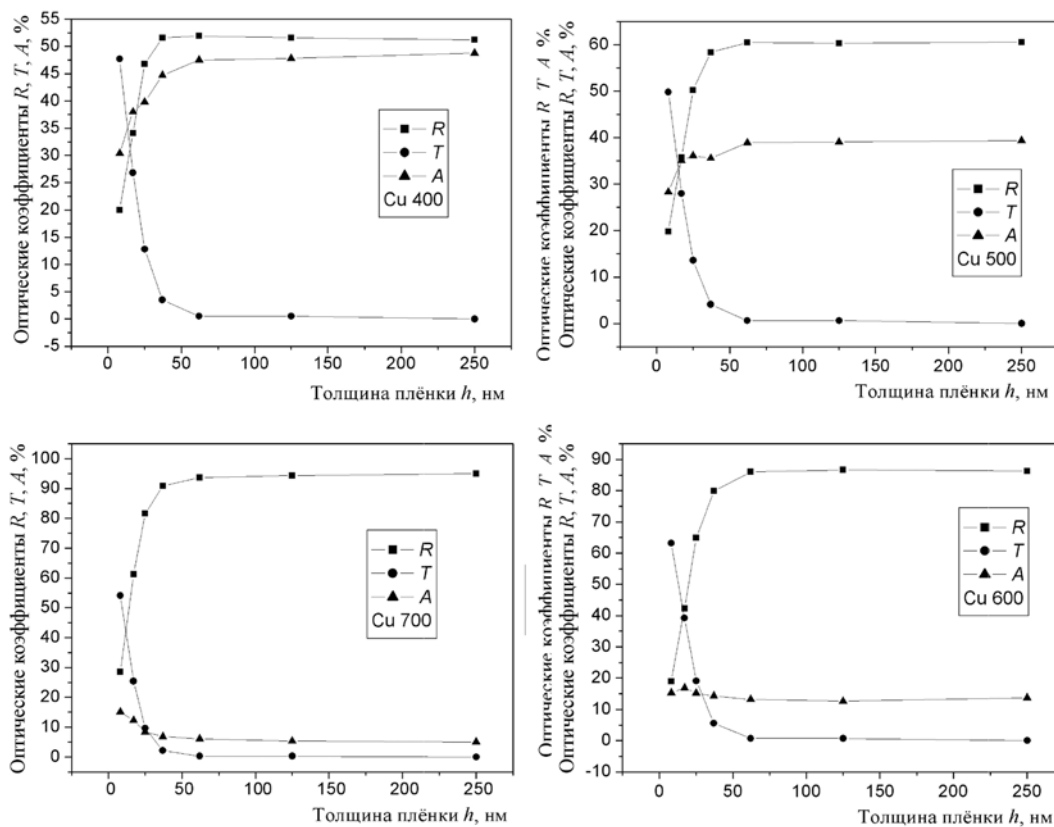


Рис. 2. Изменение коэффициентов пропускания T , отражения R и поглощения A в зависимости от толщины пленки h при различной длине волны падающего излучения ($\lambda = 400; 500; 600$ и 700 nm); материал пленки — медь

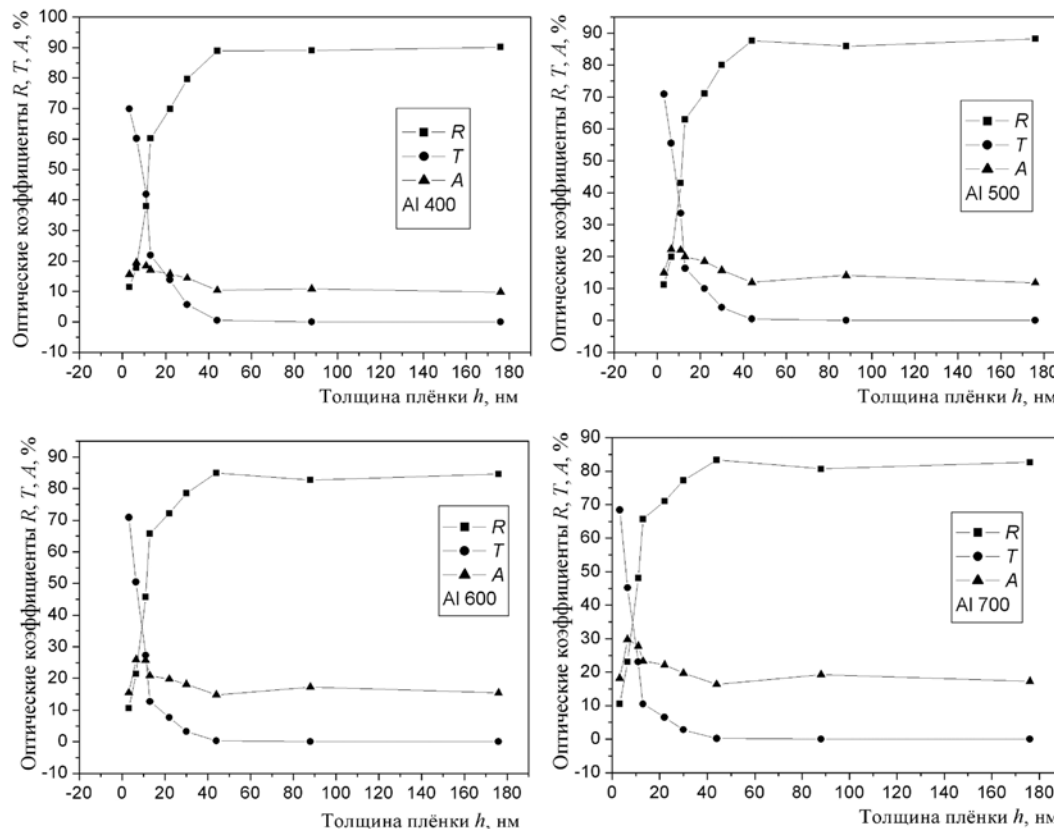


Рис. 3. Изменение коэффициентов пропускания T , отражения R и поглощения A в зависимости от толщины пленки h при различной длине волны падающего излучения ($\lambda = 400; 500; 600$ и 700 nm); материал пленки — алюминий

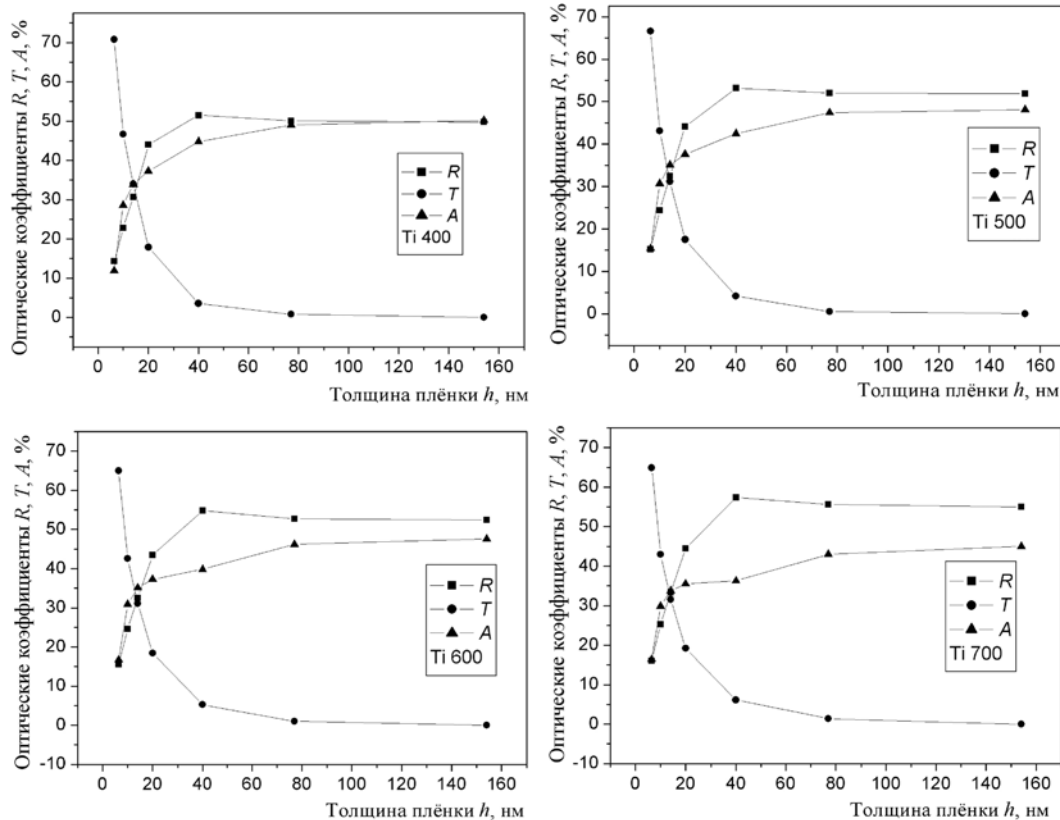


Рис. 4. Изменение коэффициентов пропускания T , отражения R и поглощения A в зависимости от толщины пленки h при различной длине волны падающего излучения ($\lambda = 400; 500; 600$ и 700 нм); материал пленки — титан

Критическую толщину h_k металлической пленки мы определяли, проведя касательные к двум ветвям графика изменения коэффициента пропускания T в зависимости от толщины пленки h (рис. 5). Значение абсциссы точки B , в которой пересекаются обе касательные, принимаем равной критической толщине h_k . Подобным способом были определены значе-

ния h_k для всех графиков $T(h)$, показанных на рис. 2—4. Результаты определения помещены в табл. 2. Здесь же приведены значения толщины пленки h_r , при которой наступает равенство обоих коэффициентов $T(h_r) = R(h_r)$.

Из табл. 2 видно, что критическая толщина h_k пленки слабо зависит от изменения длины волны

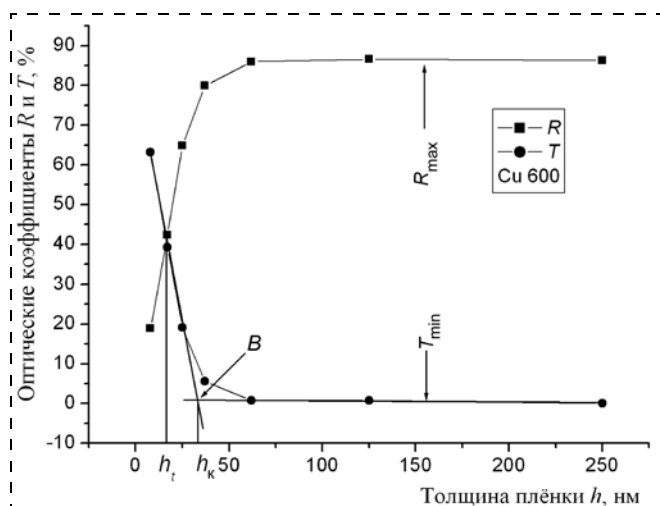


Рис. 5. Схема определения критической толщины пленки h_k ; коэффициенты пропускания $T_{\min}$ и отражения $R_{\max}$ перестают изменяться, если толщина пленки h превысит критическое значение h_k ; при толщине h_r наступает равенство коэффициентов, $T = R$; кривые сняты для медных пленок при длине волны падающего излучения $\lambda = 600$ нм

Таблица 3

Электрическое сопротивление и коэффициент электропроводности тонких металлических пленок, толщина и материал которых указаны в табл. 1

Образец	r , Ом	σ , $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$
Cu150	2,41	$1,107 \cdot 10^7$
Cu075	4,64	$1,159 \cdot 10^7$
Cu045	7,75	$1,162 \cdot 10^7$
Cu030	10,60	$1,266 \cdot 10^7$
Cu020	17,02	$1,150 \cdot 10^7$
Cu010	51,70	$8,059 \cdot 10^6$
Al240	5,35	$3,540 \cdot 10^6$
Al120	17,54	$2,160 \cdot 10^6$
Al060	31,35	$2,417 \cdot 10^6$
Al040	43,74	$2,540 \cdot 10^6$
Al030	65,14	$2,326 \cdot 10^6$
Al020	181,50	$1,413 \cdot 10^6$
Al015	185,34	$1,635 \cdot 10^6$
Al010	$3,2 \cdot 10^5$	$1,488 \cdot 10^3$
Ti240	53,43	$3,241 \cdot 10^5$
Ti120	100	$3,333 \cdot 10^5$
Ti060	235	$2,837 \cdot 10^5$
Ti045	580	$1,642 \cdot 10^5$
Ti030	725	$1,839 \cdot 10^5$
Ti020	1810	$1,151 \cdot 10^5$
Ti010	$3 \cdot 10^6$	138,9

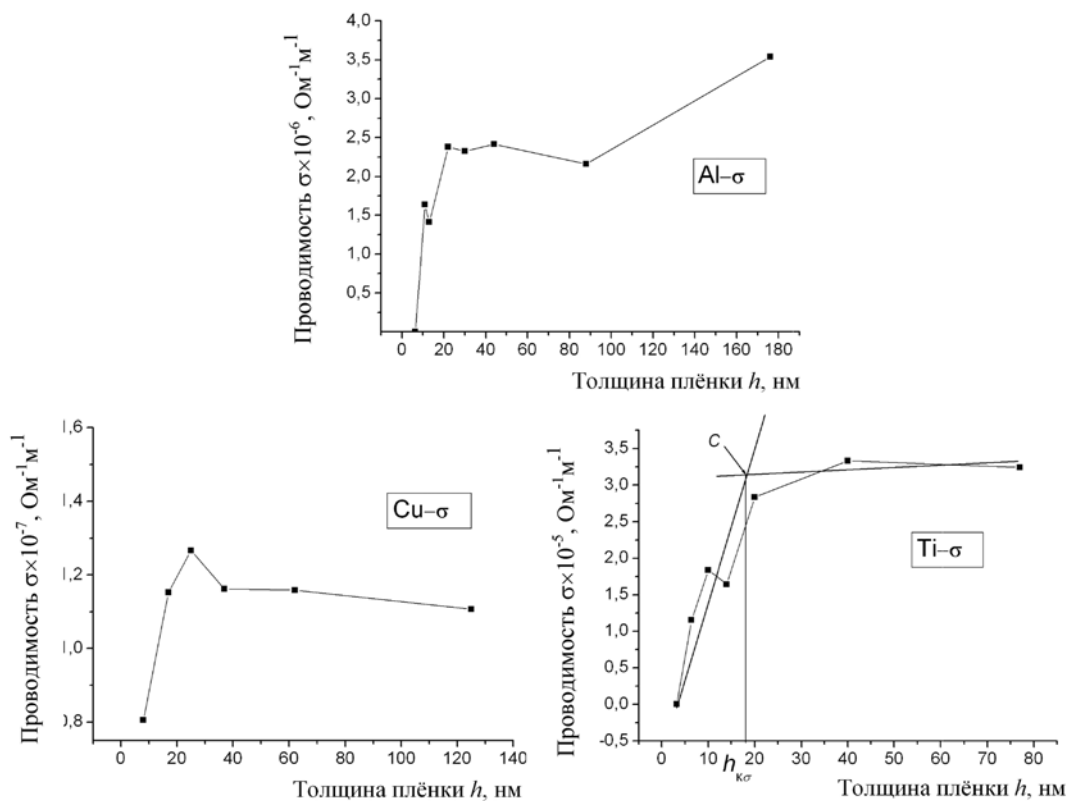


Рис. 6. Изменение коэффициента электропроводности металла σ в зависимости от толщины медной, алюминиевой и титановой пленок; критическая толщина пленки $h_{\text{КС}}$ определена как абсцисса точки C пересечения двух касательных к графику $\sigma = f(h)$

падающего излучения в диапазоне значений от $\lambda = 400$ нм до $\lambda = 700$ нм. Поэтому при обсуждении экспериментальных результатов мы будем пользоваться средним арифметическим значением $h_{\text{КС}}$, помещенным в табл. 2 для трех исследованных металлов.

В табл. 3 приведены значения электрического сопротивления r , измеренные у образцов из различных металлов с различной толщиной пленки, а также соответствующие им значения σ , вычисленные по формуле (3). Графики изменения σ в зависимости от толщины пленки показаны на рис. 6. На графиках видно, что ход кривых $\sigma = f(h)$ повторяет форму кривых $R = f(h)$ (см. рис. 2–4). По ним можно также определить критическую толщину $h_{\text{КС}}$ как абсциссу точки C пересечения касательных к двум ветвям кривой $\sigma = f(h)$ (рис. 6).

Обсуждение полученных экспериментальных данных построим на основе длины свободного пробега λ_e электронов проводимости (почти свободные электроны) внутри твердого металла, поскольку именно эти частицы определяют взаимодействие металла с излучением, а также перенос электрического тока в металле. Обычно [6] длину свободного пробега определяют как

$$\lambda_e = v_F \tau, \quad (5)$$

где скорость Ферми принимают равной

$$v_F = \frac{\hbar}{m} (3\pi^2 n)^{1/3}, \quad (6)$$

а время свободного пробега электрона определяют через известный по справочникам коэффициент электропроводности σ массивного металла:

$$\tau = \frac{\sigma m}{e^2 n}. \quad (7)$$

Подставляя уравнения (6) и (7) в уравнение (5) и заменяя константы на их числовые значения, получим

$$\lambda_e = \frac{\hbar}{e^2} (3\pi^2)^{1/3} \frac{\sigma}{n^{2/3}} \approx \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{(1,6 \cdot 10^{-19})^2} (3\pi^2)^{1/3} \frac{\sigma}{n^{2/3}} \approx 1,27 \cdot 10^4 \frac{\sigma}{n^{2/3}}. \quad (8)$$

Концентрацию свободных электронов n определяют как концентрацию ионов (или атомов) в твердом металле, умножая ее на валентность Z соответствующего металла [6]:

$$n = Z \frac{\rho}{M} = Z \frac{\rho}{m_p A} = Z \frac{\rho}{1,67 \cdot 10^{-27} A}. \quad (9)$$

Здесь ρ — плотность металла, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; M — масса атома металла, кг ; $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ — масса протона, A — атомная масса металла, а. е. м. Обычно принимают для меди $Z = 1$ и $n = 8,44 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, так как $\rho = 8960 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ и $A = 63,55$; для алюминия $Z = 3$ и $n = 1,79 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$, так как $\rho = 2698 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ и $A = 26,98$; для титана $Z = 2$ и $n = 1,13 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$, так как $\rho = 4540 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ и $A = 47,88$ [7].

Критическая толщина металлической пленки $h_{\text{к}}$ при взаимодействии с излучением, а также при протекании электрического тока $h_{\text{к}\sigma}$; λ_e — расчетная длина пробега электрона в массивном металле; σ — электропроводность массивного металла при $T = 300 \text{ К}$ [8], σ_f — электропроводность пленки при $h \geq h_{\text{к}}$

Материал пленки	λ_e , нм	$h_{\text{к}}$, нм	$h_{\text{к}\sigma}$, нм	σ , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	σ_f , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	$k = \frac{\sigma_f}{\sigma}$	$\Delta h_{\text{к}}$	$\Delta h_{\text{к}\sigma}$
Cu	42,6	30,5	28,5	$6,45 \cdot 10^7$	$1,15 \cdot 10^7$	0,18	−0,28	−0,33
Al	15,9	15,5	16,6	$4,00 \cdot 10^7$	$0,26 \cdot 10^7$	0,06	−0,02	0,04
Ti	1,3	21,3	16,0	$0,24 \cdot 10^7$	$0,03 \cdot 10^7$	0,13	15,38	11,31

Выпишем из справочника [8] значения проводимости σ для трех исследованных металлов (см. табл. 4), и подставим их в уравнение (8) вместе со значениями концентрации n , определенными выше. Полученная таким образом расчетная величина λ_e записана в табл. 4 для меди, алюминия и титана. Как видно из табл. 4, у титана длина свободного пробега электронов λ_e на порядок меньше, чем у алюминия и меди. Теоретически такая разница не имеет объяснения, и длина свободного пробега электронов в титане так и должна отличаться от λ_e в алюминии. Однако на практике происходит иначе.

Сравним критическую толщину пленки $h_{\text{к}}$, измеренную в опытах, с расчетной длиной свободного пробега электрона λ_e в массивном металле. Очевидно, что они обе практически совпадают для тонкой алюминиевой пленки, поскольку отношение $\Delta h_{\text{к}} = (h_{\text{к}} - \lambda_e)/\lambda_e = (15,5 - 15,9)/15,9 = 0,02$. Заметная разница этих величин возникает в пленке Cu, $\Delta h_{\text{к}} = (30,5 - 42,6)/42,6 = -0,28$, но она еще настолько мала, что можно говорить о совпадении величин $h_{\text{к}}$ и λ_e . Это равенство явно нарушается в пленке Ti, для которой отношение $\Delta h_{\text{к}} = (21,35 - 1,3)/1,3 = 15,38$. Таким образом, титан выпадает из условия равенства $h_{\text{к}} = \lambda_e$ при сравнении оптических характеристик, в частности, коэффициентов электропроводности, разница между экспериментальной $h_{\text{к}\sigma}$ и расчетной λ_e , равная $\Delta h_{\text{к}\sigma} = (h_{\text{к}\sigma} - \lambda_e)/\lambda_e$ в титановых пленках уменьшается. Но и здесь она остается несравненно больше, чем в пленках медных и, особенно, алюминиевых.

Однако подобная разница исчезнет, если перейти от сравнения полученных данных с расчетным параметром λ_e к чисто экспериментальным характеристикам. Результаты измерений показывают, что отношение $f_c = h_{\text{тс}}/h_{\text{к}}$ у пленок трех исследованных металлов примерно одинаково и составляет 0,48, 0,64 и 0,65 для Cu, Al и Ti соответственно (см. табл. 2). Для Al и Ti пленок эти отношения практически совпадают. Поскольку толщины $h_{\text{тс}}$ и $h_{\text{к}}$, входящие в отношение f_c , измерялись независимыми методами и для большого числа образцов, совпадение величин $h_{\text{тс}}$ и $h_{\text{к}}$ указывает на тождественность процессов взаимодействия внешнего излучения и свободных электронов внутри Al и Ti.

На данном основании мы считаем, что длина свободного пробега λ_e электронов проводимости в титане должна быть ближе к величине $h_{\text{к}\sigma} = 16 \text{ нм}$, полученной при измерении электропроводности титановых пленок, чем к расчетной величине $\lambda_e = 1,3 \text{ нм}$ (см. табл. 4). Критической толщине $h_{\text{к}\sigma} = \lambda_e$ соот-

ветствует число Z , полученное из комбинации уравнений (8) и (9):

$$Z \approx \left(1,27 \cdot 10^4 \frac{\sigma}{h_{\text{к}\sigma}} \right)^{3/2} \frac{1,67 \cdot 10^{-27} A}{\rho} \approx$$

$$\approx \left(1,27 \cdot 10^4 \frac{0,24 \cdot 10^7}{1,6 \cdot 10^{-8}} \right)^{3/2} \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 47,88}{4,54 \cdot 10^3} \approx$$

$$\approx 0,046. \quad (10)$$

Выводы

- ♦ Экспериментальные значения трех коэффициентов: отражения $R(\lambda, h)$, пропускания $T(\lambda, h)$, т. е. дисперсионные характеристики наноразмерных металлических пленок, а также электропроводности $\sigma(h)$, — приведенные в данной статье, могут служить справочным материалом для разработчиков вакуумно-плазменной технологии тонких пленок.
- ♦ Опыт показывает, что коэффициенты $R(h)$, $T(h)$ и $\sigma(h)$ изменяются в зависимости от толщины металла, пока пленка остается тонкой. Когда толщина пленки превысит критическое значение $h_{\text{к}} = 15...30 \text{ нм}$, все три коэффициента перестают зависеть, как прежде, от h , т. е. по отношению к ним материал пленки ведет себя как массивный металл.
- ♦ Поскольку критическая толщина $h_{\text{к}}$ примерно равна длине λ_e свободного пробега электрона в массивном металле, по крайней мере, в алюминии или в меди, тонкой будем называть такую пленку, для которой выполняется неравенство $h \leq \lambda_e$.

Список литературы

1. Клиндр Л., Клейн В. Стекло в строительстве: Свойства. Применение. Расчеты: Пер. с нем. П. И. Глазунова и др. / Под ред. И. П. Трохимовской, Ф. Л. Шехтера. М.: Стройиздат, 1981. 287 с.
2. Glaser H. J. Large area glass coating. Von Ardenne Anlagentechnik GmbH, Union Druckerei GmbH, Dresden, 2000. 472 p.
3. Лебедева В. В. Экспериментальная оптика. 3-е изд. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. 352 с.
4. Цуй Д. Соотношение беспорядка и взаимодействия в двумерном электронном газе, помещенном в сильное магнитное поле // Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 3. С. 320—324.
5. Вакуумные процессы и оборудование ионно- и электронно-лучевой технологии: Учеб. пособие для слушателей курсов повышения квалификации ИТР по вакуумному аппарату- и приборостроению / М. И. Виноградов, Ю. П. Маишев. М.: Машиностроение, 1989. 56 с.
6. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 792 с.
7. Эмсли Дж. Элементы: Пер. с англ. М.: Мир, 1993. 256 с.
8. Физические величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

УДК 539.216.2

Ю. В. Брюхова,
ООО "Кейденс Дизайн Системз",
Н. А. Зайцев, д-р техн. наук., проф.,
ОАО "НИИМЭ и завод "Микрон"

АНАЛИЗ РАЗБРОСА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Разброс физико-технологических параметров полупроводниковых приборов, включая приборы микросистемной техники, оказывает решающее влияние на процент выхода годных кристаллов. Описываются различные методы анализа разброса параметров полупроводниковых приборов.

Получение высокого выхода годных кристаллов при одновременно высоких технических характеристиках стало большой проблемой после преодоления технологического рубежа в 0,25 мкм [7]. В связи с этим резко возрос интерес к методам статистического моделирования, который продолжает расти по мере приближения технологии к фундаментальным физическим пределам. На процент параметрического брака стал заметно влиять разброс параметров между идентично спроектированными транзисторами в составе интегральных схем (ИС), поскольку размеры транзисторов уменьшились быстрее, чем технологические допуски на размеры и разброс параметров техпроцесса, а также межсоединения, контактные площадки и краевые эффекты, которыми раньше можно было пренебречь, и разброс которых сильно увеличился [1].

Физико-технологические параметры элементов ИС имеют разброс. Обычно это связывают с пространственными и временными флуктуациями параметров технологического процесса, таких как, например, плотность ионного пучка, состав окислителя при получении подзатворного окисла, температура

разгонки примеси, абберрация оптической системы, шероховатость поверхности фоторезиста и т. п. В аналоговых микросхемах разброс параметров является основным фактором, определяющим соотношение точность — быстродействие — потребляемая мощность. Для цифровых микросхем он является одним из барьеров, ограничивающих дальнейшее уменьшение размеров транзисторов. Для МЭМС разброс параметров является основным фактором, определяющим работоспособность. Разброс параметров неизбежен даже для хорошо управляемых и стабильных техпроцессов. В конечном итоге он приводит к разбросу параметров ИС около номинальных значений, указанных в спецификации. Часть микросхем, параметры которых выходят за границы допустимых значений, уходит в брак. Целью моделирования эффектов, связанных со статическим разбросом параметров, является [1]:

- получение максимального выхода годных кристаллов (снижение доли параметрического брака) путем оптимального выбора размеров транзисторов и их взаимного расположения, а также электрической схемы, малочувствительной к разбросу параметров элементов;

- оптимизация параметров технологического процесса для получения максимального процента выхода годных кристаллов или улучшения их характеристик;
- получение максимальной параметрической надежности проектируемых ИС;
- снижение риска неоптимального проектирования.

В настоящее время большинство кремниевых мастерских имеют специально спроектированные тестовые кристаллы для измерения значения разброса параметров. Различают статистический разброс параметров транзисторов в пределах одного кристалла (*локальный разброс* или *рассогласование параметров*) и между транзисторами, расположенными на разных кристаллах (*глобальный разброс*) [1].

Глобальный разброс делится на разброс между производственными линиями, между лотами, между пластинами и между кристаллами в пределах пластины. Разброс между лотами означает, что математическое ожидание некоторого параметра транзистора или техпроцесса, взятое для всех транзисторов в пределах одного лота, отличается от той же величины для другого лота. Этот вид разброса обычно контролируется в процессе производства [1].

Разброс между пластинами может быть пространственным и временным. Временной разброс связан с временным дрейфом параметров технологического оборудования, пространственный — с различным положением пластин в процессе групповой термической обработки лота и их структурно-примесным состоянием. Современное технологическое оборудование имеет очень малый временной дрейф параметров [1].

Пространственный разброс в пределах пластины обычно является медленно изменяющимся в

пространстве, гладким и сильно коррелированным. Линии равных параметров имеют часто радиальную симметрию или форму параллельных полос. Локальный разброс обычно больше, чем глобальный, и часто вызван особенностями топологии и топографии кристалла, например, разбросом ширины металлических проводников или канала МОП-транзисторов. Локальный разброс может быть случайным и систематическим. Систематический разброс обусловлен пространственным градиентом характеристик технологического оборудования и может составлять 50 % общего разброса [2]. Наибольшее влияние на характеристики ИС имеет систематический разброс эффективной длины канала МОП-транзистора [3]. Он связан с искажениями изображения вследствие оптической аберрации линзы вблизи предела ее оптического разрешения. Такой разброс параметров в нанометровых структурах (с характерными размерами элементов 0,1 мкм и менее) намного превышает случайный разброс компонентов. Поэтому моделирование с использованием представлений о разбросе параметров как о случайном процессе дает очень большую ошибку для нанометровых структур [3]. Однако систематический компонент локального разброса легко может быть скомпенсирован конструктивными мерами, чего нельзя сделать со случайным разбросом [1].

Случайный компонент локального разброса связан, в первую очередь, с пространственным разбросом эффективной длины канала МОП-транзистора [3]. Второе по величине влияние оказывает пороговое напряжение V_{th0} и токовый множитель β . Причиной локального разброса V_{th0} является флуктуация общего заряда легирующей примеси в канале (N_{ch}), а рассогласование по β определяется разбросом эффективной длины и ширины канала, который вызван неровностями его границ. Для длинноканальных транзисто-

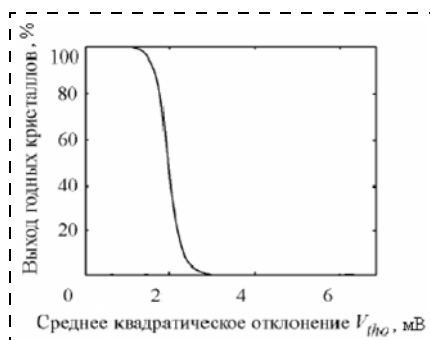


Рис. 1. Зависимость выхода годных кристаллов от рассогласования порогового напряжения транзисторных пар 8-битного цифроаналогового преобразователя [1]

ров на разброс β влияет также флуктуация подвижности носителей заряда. Поскольку перечисленные причины являются пространственно-независимыми, то параметры V_{th0} и β оказываются статистически независимыми, если рассматривать только их локальный разброс [1].

Примером локального разброса служит разброс параметров транзисторов дифференциального каскада операционного усилителя, когда характеристики схемы определяются разностью параметров двух транзисторов, а не их абсолютным разбросом. В АЦП и ЦАП разброс порогового напряжения в единицы милливольт или менее может существенно влиять на характеристики ИС или выход годных (рис. 1) [1]. Локальный разброс может быть уменьшен конструкторскими решениями, учитывающими взаимное расположение транзисторов и их геометрию.

Математическое описание разброса параметров

Основными понятиями, описывающими статистическое поведение транзисторов в ИС, являются математическое ожидание μ , среднее квадратическое отклонение σ или дисперсия σ^2 , а также ковариация $\text{cov}(\dots)$ или корреляция r параметров. Графически разброс параметров описывается гистограммой, показывающей частоту появления значений случайной величины. При увеличении числа опытных данных гистограмма стремится к непрерывной функции плотности вероятности (дифференциальной функции распределения). Простейший путь к учету разброса параметров транзисторов состоял бы в том, чтобы обработать статистически значимое число транзисторов и получить параметры функции распределения μ и σ . Однако для современных задач проектирования такой подход слишком груб или содержит много избыточной информации. В реальности значение разброса параметров зависит от площади транзисторов и расстояния между ними. Кроме того, параметры транзисторов находятся в сильной корреляционной зависимости [1].

Если значения двух параметров, измеренные для множества транзисторов, указать на графике (рис. 2), то можно обратить внимание, что между этими параметрами имеется зависимость: при увеличении подвижности элек-

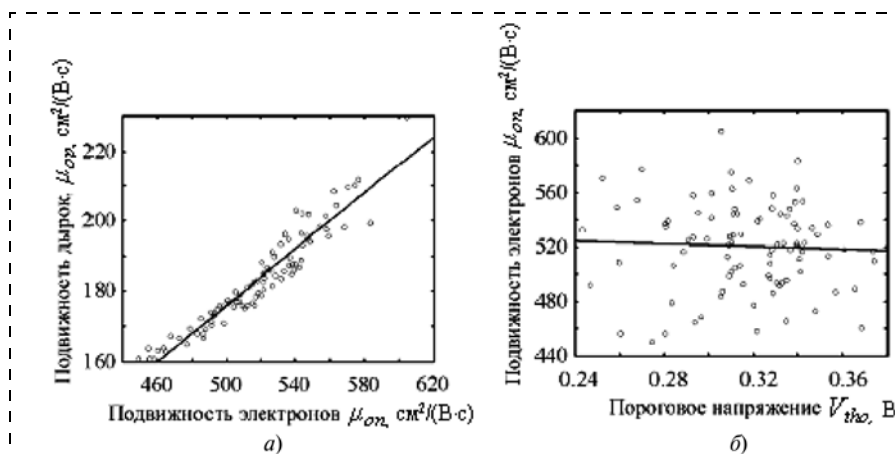


Рис. 2. Пример сильной (а) $r = 0,954$ и слабой (б) $r = -0,045$ корреляции параметров. Показана также линия средней квадратической регрессии [1]

тронов увеличивается и подвижность дырок. Однако зависимость эта является статистической. Экспериментальные точки могут группироваться очень близко к прямой линии, которая аппроксимирует эту зависимость, и тогда статистическая зависимость приближается к детерминированной. Степень отличия статистической зависимости от детерминированной характеризуют понятием ковариации $\text{cov}(x, y)$ двух случайных величин [1]:

$$\text{cov}(x, y) = M[(x - \mu_x)(y - \mu_y)] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y), \quad (1)$$

где i — номер транзистора, для которого измерены значения параметров x и y ; μ_x, μ_y — математические ожидания этих параметров; n — число измерений; $M[\cdot]$ — математическое ожидание случайной величины, стоящей в квадратных скобках.

Если отклонения случайных величин в выражении (1) от математического ожидания нормировать на значение среднего квадратического отклонения σ_x и σ_y , то получим коэффициент корреляции величин x и y :

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y}. \quad (2)$$

Прямая линия, проведенная через экспериментальные точки таким образом, что сумма квадратов их отклонений от этой линии минимальна, называется линией средней квадратической регрессии. Тангенс угла наклона этой линии называется коэффициентом регрессии.

Уравнение линии регрессии имеет вид:

$$y = R(x - \mu_x) + \mu_y, \quad (3)$$

где R — коэффициент регрессии. Он вычисляется через коэффициент корреляции r_{xy} , и средние квадратические отклонения σ_x и σ_y , как

$$R = r_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x}. \quad (4)$$

Коэффициент корреляции приобретает ясный физический смысл, если статистические переменные центрировать относительно математического ожидания и нормировать на значение среднего квадратического отклонения. При этом средние квадратические отклонения нормированных величин равны единице и коэффициент корреляции становится равен тангенсу наклона линии средней квадратической регрессии.

На рис. 2 показаны примеры сильной (а) и слабой (б) корреляции параметров [1].

Статистическая зависимость между параметрами в общем случае нелинейная, однако, поскольку отклонение параметров от среднего значения обычно невелико (5...15 %), в этих пределах зависимость можно считать линейной [1].

Параметры моделей для статистического моделирования

Достоверные значения величин $\mu, \sigma, \text{cov}(\cdot, \cdot)$ можно получить, имея параметры статистически значимого числа транзисторов (обычно от нескольких сотен до нескольких тысяч). Классический подход к получению статистических параметров компактных моделей состоит в том, что по обычной методике, разработанной для каждой модели, выполняют экстракцию ее параметров (их число для разных компактных моделей колеблется от 50 до 500), затем путем статистической обработки получают требуемые значения $\mu, \sigma, \text{cov}(\cdot, \cdot)$ [1].

Однако такой путь является очень трудоемким (несколько недель работы, включая измерения [4]) и требует для каждой модели несколько тестовых транзисторов разной геометрии. Кроме того, технологический процесс на практике периодически подстраивается для получения максимального выхода годных кристаллов и полученная таким способом информация быстро устаревает [1].

Поэтому для статистического моделирования используют особые методики экстракции параметров. Упрощение методики воз-

можно благодаря тому, что для статистического моделирования нужны не абсолютные значения параметров P_i , а только их дисперсии $\sigma_{P_i}^2$ [1].

Существенным требованием к статистическим параметрам является их независимость от типа компактной модели и конкретной конструкции транзистора, а также тесная связь с технологией его изготовления. Такими параметрами являются, толщина подзатворного окисла T_{ox} , технологическое отклонение длины ΔL и ширины ΔW канала, концентрация примеси в подложке N_{sub} , подвижность носителей в канале μ , удельное сопротивление областей истока и стока ρ_{sh} , глубина залегания p - n -переходов LDD -области X_j . Применение таких (технологических) параметров позволяет предсказать изменение выхода годных ИС при изменении параметров техпроцесса, не прибегая к повторной идентификации параметров компактных моделей. Кроме того, технологические параметры слабо коррелированы, что позволяет отказаться от применения метода главных компонентов. Для сокращения трудоемкости статистического анализа часто используют не более 3—4 технологических параметров, оказывающих наибольшее влияние на характеристики транзистора, считая остальные параметры фиксированными [1].

Применение программ физико-технологического моделирования

Зная разброс параметров технологического оборудования, с помощью программы физико-технологического моделирования и метода Монте-Карло можно получить множество вольт-амперных характеристик транзисторов, позволяющих выполнить экстракцию статистических параметров компактных моделей [5, 6]. Преимуществом применения программ физико-технологического моделирования является возможность параллельной разработки электрической схемы ИС и технологии ее изготовления, что сокращает срок

выхода изделия на рынок. Знание оценки выхода годных ИС до разработки техпроцесса позволяет оптимизировать его на ранней стадии и тем самым увеличить выход годных кристаллов [1].

По поводу применения программ физико-технологического моделирования распространен скептицизм, основанный на том, что нетрудно найти пример, когда даже коммерческие программы дают результаты, не согласующиеся с экспериментом [1]. Основной причиной несоответствий является неадекватное использование программ моделирования, заключающееся в том, что существующие программы должны быть использованы для конкретного класса и типа приборов, а также отсутствие надежной метрологической базы для измерения двумерного профиля легирующей примеси. Кроме того, постоянное развитие технологии приводит к появлению новых материалов и физических эффектов (например, квантово-механических эффектов при моделировании тонкого подзатворного окисла, эффектов механического напряжения кремния и др.), что требует модернизации программ моделирования. К ограничениям этого метода следует отнести также проблематичность (или чрезмерную трудоемкость) моделирования трехмерных эффектов, без чего невозможно идентифицировать, например, математическую модель эффекта узкого канала [1].

Одним из самых узких мест в применении физико-технологического моделирования является выбор входных параметров моделирующей программы. Применение параметров, полученных из электрофизических измерений, дает очень большие ошибки. Поэтому физико-технологические программы можно использовать только после итерационной подстройки параметров программы по результатам сравнения с экспериментом [1].

К потенциальным достоинствам метода можно отнести: возможность быстрого моделирования приборов, для которых еще не

создана модель, эффектов внешних воздействий (магнитного поля, радиации), саморазогрева прибора; уменьшение времени, необходимого на разработку модели, и экономических затрат, связанных с этим; уменьшение времени, необходимого для принятия решения о целесообразности выполнения того или иного проекта, так как, используя этот метод, можно оценить возможности проектирования ИС в выбранном технологическом базисе. Также с помощью этого метода можно более четко определять состав тестового кристалла, включая в него элементы калибровки, необходимость которых может быть выявлена в ходе комплексного моделирования.

Несмотря на недостатки, перечисленные выше, как отечественные, так и зарубежные (например, *Nanosys Inc.* [13]), фирмы начинают применять программы физико-технологического моделирования для получения параметров компактных моделей полупроводниковых приборов [12].

Калибровку модели технологического процесса выполняют по соответствию толщины слоев и профилей легирования реальной структуры и модели. Оптимизации подлежат коэффициенты диффузии легирующей примеси и параметры модели процесса ионной имплантации. Для этого результаты моделирования сравнивают с профилями примеси, полученными из электрофизических экспериментов. Дозу имплантации оценивают по измерению поверхностного сопротивления имплантированных слоев, энергию имплантации получают по напряжению, заданному на имплантационной установке. Набор режимов диффузионной печи может быть использован для определения разброса времени, температуры и потока газа на этапах диффузии и окисления. Измерения толщины слоев используются для определения технологического разброса на этапах окисления, получения по-

ликристаллического кремния и спэйсера [1, 5, 7, 14].

Программу физико-технологического моделирования транзисторных структур калибруют по соответствию вольт-амперных характеристик. Для этого используют набор тестовых структур с разной длиной и шириной канала (рис. 3), которые могут быть использованы одновременно как для калибровки физико-технологической модели, так и для экстракции параметров компактной модели. В набор тестовых структур включены транзисторы с длиной и шириной канала, которые лежат за пределами топологических норм проектирования. Они необходимы для моделирования разброса геометрических размеров, которые в реальных структурах также выходят за границы проектных норм (рис. 3) [1].

Наиболее эффективным методом получения статистической информации с помощью физико-технологического моделирования является метод Монте-Карло (выполняют 100...150 актов моделирования для каждой топологии транзистора [5]). Входными параметрами для моделирования является разброс параметров технологического оборудования. Для корректного применения паспортных данных оборудования необходимо очень глубоко понимать их смысл и методике измерения; при возможности желательно измерить их заново [1].

Для экстракции параметров компактных моделей из результа-

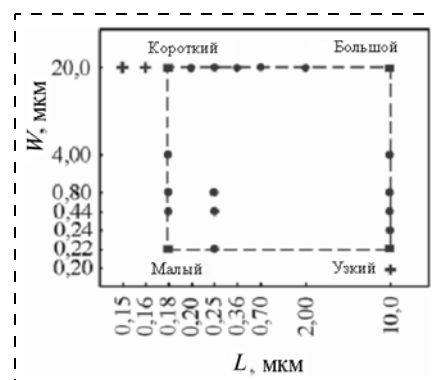


Рис. 3. Набор размеров тестовых структур для калибровки физико-технологической модели и экстракции параметров компактной модели [1]. Крестиками помечены дополнительные размеры, выходящие за границы проектных норм

тов физико-технологического моделирования используют те же средства, что и при экстракции из экспериментальных данных [5]. Для этого вольт-амперные характеристики, полученные после физико-технологического моделирования, вводят в программу экстракции параметров компактных моделей точно так же как и экспериментальные данные, в соответствии со стратегией экстракции для конкретной модели. После экстракции параметров можно установить соответствие между разбросом параметров техпроцесса и компактной модели [1].

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение толщины окисла, порогового напряжения и тока стока в режиме насыщения, полученные по описанной методике, могут отличаться от экспериментальных данных на 10 % [1, 5].

Метод главных компонент

Метод главных компонент (Principal Component Analysis, PCA) позволяет уменьшить число статистических переменных при сохранении максимально возможного количества статистической информации, содержащейся в исходных данных [1].

Для этого выполняется линейное преобразование пространства входных коррелированных переменных в новое пространство статистически независимых переменных, которые называются главными компонентами. Главные компоненты сортируются по значению дисперсии, затем отбираются первые несколько из них таким образом, что их суммарная дисперсия приблизительно равна сумме дисперсий всех главных компонент. Это позволяет пренебречь остальными главными компонентами. Поэтому число переменных, которые надо варьировать при статистическом моделировании, становится меньше. В работе [8] приводится пример, когда 50 входных параметров модели BSIM3 были заменены всего восьмью главными компонентами при сохранении 90 % суммарной дисперсии. В другом примере [9] из 27 параметров

модели МОП-транзистора Level 3 было отобрано только шесть параметров, которые обеспечили 81 % суммарной дисперсии. В работе [10] для 16 параметров модели BSIM было отобрано только шесть главных компонент, в работе [11] были оставлены только 2–3 главных компонента взамен 15 параметров модели Level 3, которые сохраняют 75 % дисперсии входных параметров [1].

Перед применением метода главных компонент желательно проанализировать имеющиеся данные и чувствительность тока стока модели к изменению ее параметров. После такого анализа можно сократить набор параметров модели. Однако для аналоговых цепей, которые особенно чувствительны к разбросу параметров, этот подход может дать слишком грубый результат [1].

Методы статистического моделирования интегральных схем

Основной проблемой статистического моделирования является сокращение вычислительных затрат при сохранении приемлемой достоверности полученных результатов. Решение этой проблемы ведется по двум направлениям: путем рационального выбора точек, в которых выполняются однократные расчеты, и путем упрощения процедуры моделирования для каждого расчета [1].

На первом направлении используют метод наихудшего случая, метод вершин, метод Монте-Карло, методы планирования эксперимента. На втором направлении используют метод поверхности отклика (метод макромоделирования), градиентный метод, иерархический блочный метод, метод главных компонент, метод моделирования критических путей, метод прямых выборок [1].

Прямое решение задачи статистического моделирования состояло бы в том, чтобы выполнить как можно большее количество расчетов ИС при изменении входных параметров моделей транзисторов с мелким шагом в пределах их разброса, например, от -3σ до

$+3\sigma$, чтобы построить функцию распределения выходных параметров (быстродействие, потребляемая мощность, динамический диапазон и т. п.). Однако такой подход оказывается практически нереализуемым, поскольку, даже если брать всего два значения каждого из входных параметров, для перебора всего 16 величин нужно $2^{16} = 65536$ расчетов на SPICE, что для цепей большой размерности практически неосуществимо [1]. Поэтому используют несколько методов, позволяющих сократить число расчетов при незначительном снижении точности. В их основе лежит упрощение математической модели моделируемой цепи, которое возможно благодаря тому, что диапазон изменения параметров при статистическом моделировании достаточно мал (10...15 %), а требуемая точность невысока. Используется также статистическое подобие функционально различных фрагментов электрических цепей и высокая степень структурной однородности цифровых ИС [1].

Заключение

Уменьшение характерных размеров транзисторов привело к увеличению разброса их параметров и снижению процента выхода годных. Увеличилась стоимость выполняемых проектов и комплекта фотошаблонов. Оба фактора привели к резкому возрастанию потребности в быстром получении достоверных компактных моделей полупроводниковых приборов.

Несмотря на актуальность проблемы, фактически еще нет единой, общепризнанной и широко используемой методики получения параметров моделей. Перспективными направлениями идентификации параметров компактных моделей полупроводниковых приборов являются их экстракция из результатов электрических тестов и применение программ физико-технологического моделирования. Особенно актуальными и наименее изученными являются задачи идентификации параметров компактных моделей МЭМС и нанометровых

вых полупроводниковых приборов. Идентификация параметров моделей МЭМС важна в случае разработки интегрированных систем, которые в настоящее время получают все большее развитие.

Список литературы

1. Денисенко В. В. Моделирование разброса параметров транзисторов в КМОП СБИС // Компоненты и технологии. 2003. № 8. С. 40—45; № 9. С. 32—32; № 10.
2. Felt E., Narayan A., Sangiovanni-Vincentelli A. Measurement and modeling of MOS transistor current mismatch in analog IC's // Proc. IEEE/ACM Int. Conf. on Computer-Aided Design. 1994. Nov. 6—10 1994. P. 272—277.
3. Orshansky M., Milor L., Pinhong Chen, Keutzer K., Chenming Hu. Impact of systematic spatial intra-chip gate length variability on performance of high-speed digital circuits // Computer Aided Design, 2000. ICCAD—2000. Proc. IEEE/ACM International Conference on. 2000. P. 62—67.
4. Lee S.-H., Lee D.-Y., Kwon T.-J., Lee J.-H., Park Y.-K., Kim B.-S., Kong J.-T. An efficient statistical model using electrical tests for GHz CMOS devices // Proc. 5th International Workshop on Statistical Metrology. 2000. P. 72—75.
5. Rankin N. S., Ng C., Ee L. S., Boyland F., Quek E., Keung L. Y., Walton A. J., Redford M. Statistical SPICE analysis of a 0,18 um CMOS digital/analog technology during process development // Proc. IEEE 2001 Int. Conf. on Microelectronic Test Structures. March 2001. Vol. 14. P. 19—23.
6. Бубеников А. Н., Садовников А. Д. Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС. М.: Радио и связь, 1991. 287 с.
7. Денисенко В. В. Особенности субмикронных МОП-транзисторов // Chip News. 2002. № 7. Сентябрь. С. 27—37.
8. Gneiting T. An Investigation into the Implementation of Advanced High Performance Integrated Circuits in Deep Submicron // Process Generations 6 Ph. D. Thesis. Department of Electrical Engineering and Electronics Brunei University, June 1997.
9. Accurate Worst-Case Model Generation with SPAYN // Silvaco Simulation Standard. 1994. Oct. Vol. 5. N 2.
10. Michael C., Ismail M. Statistical modeling of device mismatch for analog MOS integrated circuits // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1992. Feb. Vol. 27. N 2. P. 154—166.
11. Felt E., Zanella S., Guardiani C., Sangiovanni-Vincentelli A. Hierarchical statistical characterization of mixed-signal circuits using behavioral modeling // Digest of Tech. Papers. IEEE/ACM International Conf. on Computer-Aided Design. Nov. 10—14, 1996. ICCAD-96. P. 374—380.
12. <http://www.nanotechwire.com/news.asp?nid=854&ntid=116&pg=49>
13. <http://www.nanosysinc.com/>
14. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Система кремний—диоксид кремния субмикронных СБИС. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2003.

УДК 532.5; 532.527

Д. Г. Ахметов, канд. физ.-мат. наук,
Э. Г. Косцов, д-р физ.-мат. наук,
А. А. Соколов, канд. физ.-мат. наук,
Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
г. Новосибирск

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ИНЖЕКТОРЫ МИКРОСТРУЙ ЖИДКОСТИ

Проведено исследование возможностей построения на основе высокоэнергетических электростатических микроактюаторов, работающих в циклическом режиме, высокопроизводительных микронососов и инжекторов микроструй жидкости. Описываются конструкция и особенности функционирования таких устройств, их характерные параметры. Показано, что микроактюатор с площадью 1 мм способен за один такт длительно-стью 30...300 мкс инжектировать микрострую жидкости с массой 1...3 мкг, истекающую со скоростью 1...10 м/с и более, в зависимости от радиуса выходного сопла.

Разработка микроэлектромеханических систем (МЭМС) является одним из наиболее динамично развивающихся направлений современной микроэлектроники, она дает возможность построения

принципиально новых устройств. Одним из перспективных применений МЭМС является использование их в устройствах, обеспечивающих инжектирование микроструй жидкости и газа, при создании микронососов для перекачки жидкостей и при разработке самодвижущихся надводных и подводных микроаппаратов и т. п.

В последние годы в различных областях техники наблюдается все возрастающий интерес к микроструйным технологиям (*microfluidic device, microfluidic chip, lab-on-a-chip*), которые способны управлять небольшими объемами жидкостей при проведении, например, количественных химического и биологического анализов, иммунологических обследований, тестов на наличие антигенов или антител в организме человека и т. д. [1—11]. Прецизионная подача микрообъемов жидкости в заданное место отличается рядом качественных, не имеющих аналогов характеристик: малым временем процесса (анализа), низкой стоимостью, возможностью исключения источников загрязнения. Миниатюризация объема, в котором происходит химическая реакция, уменьшает число необходимых проб, дает возможность выполнять анализы быстро и с меньшим числом ручных операций, позволяя значительно упростить и удешевить проведение медицинской диагностики.

Микронососы, встроенные в интегральные схемы, уже применяются для охлаждения участков локального перегрева [12—14]. При этом требуется

достаточно высокая интенсивность потока жидкости, например, для охлаждения микросхем, выделяющих энергию до 100 Вт, необходимо обеспечить поток жидкости с расходом свыше 10—100 мл/мин, что может быть достигнуто только при давлении жидкости в каналах ее движения до 100 кПа. Возможно использование МЭМС-насосов и в топливных элементах сотовых телефонов и портативных компьютерах. Такие микронасосы применяются и в космосе, для придания импульса движения микро-спутникам [15, 16]. Микроимпульс сжатого газа с расходом ~1 мл/мин достаточен для существенного изменения движения на орбите микро-спутника с массой ~1...5 кг.

В настоящее время наиболее распространенной областью практического применения микронасосов являются струйные принтеры. При работе таких устройств выстреливаются микрокапли с объемом ~ 3...10 пл с тактовой частотой 10...100 кГц.

Однако на пути создания более эффективных микронасосов имеется ряд проблем, связанных, прежде всего, с удельной энергоемкостью их микро-актюаторов. Действие большинства существующих микронасосов основано на двух принципах передачи энергии от внешнего источника инжектируемой капли или струе жидкости.

Первый принцип состоит в том, что накачка энергии осуществляется непосредственно в жидкость, например, путем ее перегрева в микрообъеме, как в термоструйных принтерах, или путем создания электрического разряда в объеме жидкости, что приводит к повышению давления в жидкости и к последующему истечению жидкости через сопло во внешнюю среду.

Второй принцип передачи энергии основан на использовании упругих диафрагм, при изгибе которых за счет внешнего воздействия повышается давление в камере с жидкостью, и жидкая струя инжектируется во внешнюю среду. Прогиб диафрагмы обеспечивается механическим толкателем. Эффективность этого принципа преобразования энергии внешнего источника в механическое движение жидкости значительно выше, так как потери энергии в данном случае происходят только в тракте передачи усилия на прогиб диафрагмы.

Важнейшей характеристикой указанных устройств является удельная энергоемкость — отношение потребляемой мощности к массе движителя или механическая энергия, получаемая с единицы рабочей поверхности устройства. Работа наиболее эффективных диафрагменных микронасосов основана на двух емкостных принципах электромеханического преобразования энергии: на пьезоэлектрических [17—26] и электростатических микроактюаторах [27—34].

Следует отметить, что тонкие пьезоэлектрические пленки не обладают достаточной для эффективной работы микронасосов энергоемкостью. Поэтому в настоящее время используются тонкие пластины пьезокерамики толщиной порядка 200 мкм (суммарная толщина вместе с пассивной

пластиной достигает 500 мкм). Вследствие высокой жесткости таких пластин при диаметре ~4...5 мм пьезоэффект обеспечивает прогиб мембраны только на 0,18...0,2 мкм при напряжении 70...100 В и давлении под мембраной до 1 МПа, что позволяет инжектировать капли диаметром порядка 10 мкм с начальной скоростью 0,1—0,2 м/с, или перекачивать жидкость с производительностью 10...500 мкл/мин [19].

По сравнению с пьезоэлектрическими струйными головками диафрагменный МЭМС-инжектор (MEMSJet), основанный на электростатическом принципе, имеет ряд существенных преимуществ, из которых можно отметить большую технологичность изготовления, возможность массового производства и небольшие размеры устройства. Первые публикации, описывающие микроэлектромеханические диафрагменные инжекторы, появились в 1998 г. [20, 25, 26]. Они предназначались для струйной печати.

Конструкция электростатических МЭМС основана на использовании сил электростатики, которые втягивают подвижный электрод в межэлектродный зазор (его толщина не более 2 мкм), с силой тяги $(V^2 \partial C / \partial x) / 2$ (V — значение напряжения; C — емкость структуры электрод — воздушный зазор — электрод). Однако такие МЭМС-актюаторы имеют существенные недостатки: малую удельную емкость $\approx 4\text{--}5 \text{ пФ/мм}^2$; энергоемкость, не превышающую $0,01 \text{ Дж/м}^2$; силу тяги до $1\text{--}10 \text{ мкН}$. Увеличение мощности достигается лишь параллельным включением большого числа микроактюаторов и увеличением площади поверхности устройства.

Ранее в работах [35—43] были описаны новые высокоэнергоемкие электростатические шаговые линейные микродвигатели, основанные на электромеханическом преобразовании энергии в процессе электростатического прижатия (наката) тонкой металлической пленки, закрепленной на поверхности подвижной пластины (ПП), к поверхности сегнетоэлектрика с высоким значением диэлектрической проницаемости. Неподвижная пластина (НП) отделена от ПП зазором D . Микродвигатель — плоский, его толщина определяется толщинами подложек для ПП, НП и зазором D , в среднем каждая из этих величин имеет значение порядка 100 мкм.

Указанные преобразователи энергии имеют удельную энергоемкость $A_{уд} \approx 0,1\text{--}1 \text{ Дж/м}^2$ и более, они способны развивать удельные силы $\sim 0,1\text{--}0,3 \text{ Н/мм}^2$. Характерные особенности работы таких микродвигателей следующие: максимальное значение силы тяги достигается в первые моменты действия импульса напряжения; мощность, развиваемая микродвигателем, зависит от нагрузки и имеет оптимум относительно нагрузки, длительность импульса напряжения t_p лежит в микросекундном диапазоне $t_p = 30\text{--}500 \text{ мкс}$.

Целью настоящей работы является исследование возможностей построения на основе указанных линейных электростатических микродвигателей, работающих в циклическом режиме микроактюатора, высокопроизводительных микронасосов и микро-

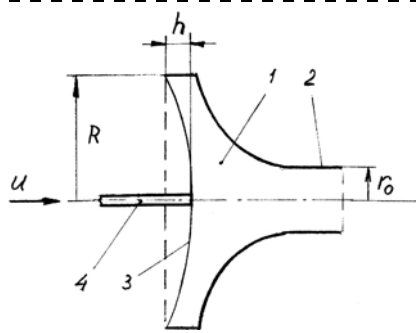


Рис. 1. Схема устройства для создания импульсных микроструй жидкости

инжекторов жидкости. Такие устройства способны выполнять также и роль микродвижителей для перемещения погруженных в жидкость микрообъектов за счет преобразования энергии движения подвижной пластины микроактюатора в прогиб мембраны, обеспечивающей повышение давления в резервуаре и истечение струи жидкости из сопла микродвижителя. Схематично конструкция рассматриваемого устройства представляет собой (рис. 1) резервуар 1 с жидкой средой, отделенной от исполнительного устройства тонкой мембраной 3 с радиусом R , которая упруго изгибается под действием сил, развиваемых микроактюатором, при смещении ПП на величину h (прогиб центра мембраны) посредством передаточного механизма 4 — толкателя. Струя выталкивается из камеры мембраной 3 через сопло 2 радиуса r_0 .

Гидродинамические характеристики осесимметричной затопленной струи, вытекающей из сопла в неограниченное пространство, заполненное жидкостью, определяются энергетическими параметрами микроактюатора. Приближенно можно принять, что мембрана, прогибаясь, принимает форму сферической поверхности, следовательно, объем жидкости $V(t)$, выталкиваемой из камеры при деформации мембраны, при $h/R \ll 1$ равен объему сферического сегмента с радиусом основания R и высотой h :

$$V(t) = \pi h(3R^2 + h^2)/6 = \\ = \pi R^2 h \left[1 + \frac{1}{3} (h/R)^2 / 3 \right] / 2 \approx \pi R^2 h / 2.$$

Этот объем равен объему жидкости

$V_1(t) = \pi r_0^2 \int_0^{t_p} u_0(t) dt$, вышедшей из сопла со скоростью u_0 за время t_p . Дифференцируя равенство $V = V_1$ по времени, получим формулу для определения скорости струи u_0 в зависимости от скорости движения центра мембраны,

$$u(t) = dh/dt,$$

и геометрических размеров устройства:

$$u_0(t) = u(t)(R/r_0)^2/2.$$

Таким образом, скорость истечения струи u_0 зависит квадратично от отношения радиусов R/r_0 , а длина вытекающей струи может быть оценена как $s = \bar{u}_0 t_p$, где $\bar{u}_0$ — среднее значение скорости струи за время t_p .

Для анализа работы устройства будем использовать модель электромеханического преобразования энергии, основанного на электростатическом накате тонкой металлической пленки — лепестка (его длина L , ширина b , толщина d) на поверхность сегнетоэлектрической пленки, с учетом перераспределения накапливаемой в структуре энергии электрического поля с удельной величиной $A_{уд}$ на кинетическую энергию движения ПП с массой m , на работу сил нагрузки микроактюатора F (на перемещение массы m , преодоление сил трения с коэффициентом k и сил сжатия пружины) [35–38]. В момент действия импульса напряжения подвижная пластина приходит в движение и совершается работа по переносу масс ПП и жидкости, а также работа на сжатие пружины (прогиб диафрагмы). Возможны два режима работы устройства — режим одного импульса и режим подачи серии импульсов. В последнем случае наиболее эффективным способом преобразования энергии электрического поля в движение жидкости является резонансный режим работы устройства.

В любой момент времени t шаг ПП, равный прогибу центра мембраны h , длина электростатически прижатой части лепестка $l(t)$ и зазор D между ПП и НП связаны соотношением [43]

$$(L - l)^2 = D^2 + h^2. \quad (1)$$

Поскольку $D/(L - l) \ll 1$, то $h \approx D^2/2[L - l(t)] - 1$, следовательно,

$$dh/dl \approx D^2/2(L - l)^2. \quad (2)$$

Если обозначить через $A_{уд} bdl$ элементарную работу электростатического поля, то закон движения центра мембраны может быть записан в виде

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = A_{уд} b D^2 / h^2 - kmg - F_{\pi}(h), \quad (3)$$

где g — ускорение силы тяжести; $F_{\pi}(h)$ — сила пружины. Сила пружины, направленная в сторону, противоположную начальному движению ПП, после окончания импульса напряжения обеспечивает возвращение мембраны в исходное состояние. Предполагается, что сила пружины зависит от перемещения h (прогиба) мембраны линейно $F_{\pi}(h) = F_{\pi}(0) + \alpha h$. Начальное значение натяжения пружины $F_{\pi}(0)$ снижает амплитуду колебаний мембраны в отсутствии напряжения. При анализе работы устройства варьировались следующие параметры: значение $A_{уд}$, длительность импульса напряжения t_p , тактовая частота импульсов $1/(t_p + t_2)$, начальная сила пружины $F_{\pi}(0)$ (она может определяться параметрами мембраны) и коэффициент упругости пружины α . Из численного решения уравнения (3) получены основные характе-

ристики рассматриваемых микроструйных устройств.

На рис. 2, а—в представлены типичные кривые, характеризующие при действии одиночного импульса напряжения и для типичных значений параметров экспериментально исследованного элемен-

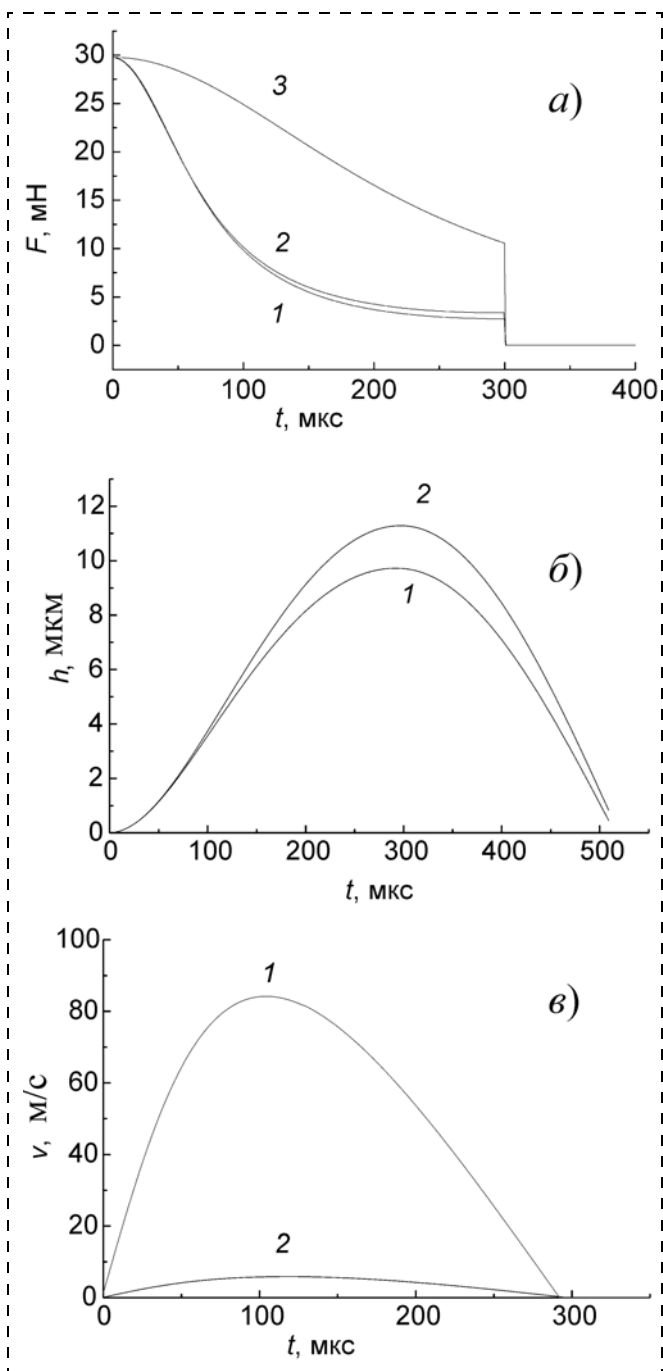


Рис. 2. Поведение во времени основных характеристик микроустройства при следующих параметрах:

$L = 1$ мм, $b = 500$ мкм; $D = 100$ мкм; $A_{уд} = 0,3$ Дж/м²; $\alpha = 1500$ Н/м; $t_p = 300$ мкс; $E = 1,1 \cdot 10^{11}$ Н/м², $R = 1$ мм; $m = 3 \cdot 10^{-5}$ кг и двух значениях r_0 (25 и 100 мкм, кривые 1 и 2); а — силы тяги микроактюатора F_x (кривая 3 — $m = 3 \cdot 10^{-4}$ кг); б — значения прогиба центра мембраны $h(t)$; в — скорости микроструи на выходе сопла $v(t)$

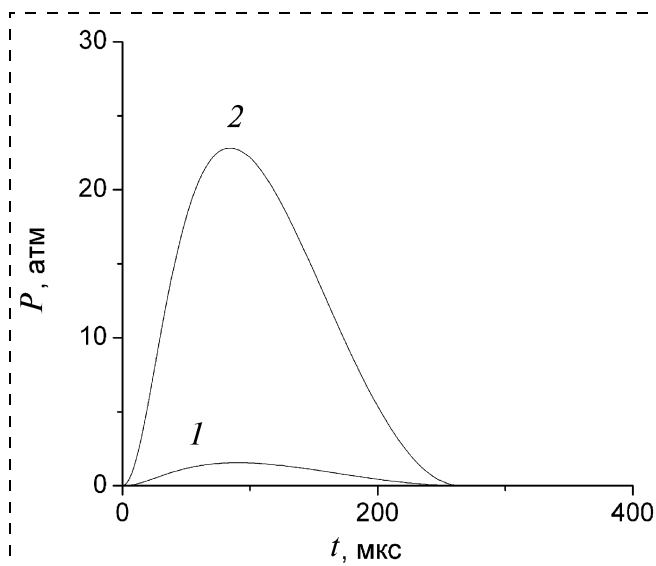


Рис. 3. Изменение во времени давления в камере $P(t)$ для $A_{уд} = 0,1$ Дж/м², (кривая 1) и $A_{уд} = 1$ Дж/м² (кривая 2) при $r_0 = 50$ мкм

тарного микроактюатора ($D = 100$ мкм; $L = 1$ мм, $b = 500$ мкм, $A_{уд} = 0,3$ Дж/м²) распределения во времени силы тяги ПП, скорости движения центра мембраны $v(t)$ и скорости истечения микроструи V_{out} для двух значений r_0 (25 и 100 мкм, кривые 1, 2), $R = 1$ мм; $m = 3 \cdot 10^{-5}$ кг; коэффициент жесткости пружины $\alpha = 1500$ Н/м; $t_p = 3 \cdot 10^{-4}$ с. При указанных значениях r_0 масса инжектируемой за время $t_p = 3 \cdot 10^{-4}$ с микроструи составляет 760 и 890 пл, а средняя за время действия импульса сила тяги 10,2 и 9,8 мН, при количестве движения $5 \cdot 10^{-7}$ и $4,1 \cdot 10^{-8}$ кг·м/с, соответственно.

Отличительным моментом работы указанных микроактюаторов является зависимость их силы тяги от нагрузки — при незначительных нагрузках эта сила быстро уменьшается во времени (рис. 2, а), и использование энергии источника напряжения становится неэффективным. Поэтому необходимо согласование основных параметров устройства применительно к задачам повышения производительности микронасоса или достижения максимальной скорости жидкости на выходе сопла и т. д. Сила тяги слабо чувствительна к коэффициентам трения и жесткости пружины и более чувствительна к значению массы ПП (см. рис. 2, а, кривая 3). Наиболее рациональным решением повышения эффективности микронасоса является согласование значений m и R .

На рис. 3 и 4 представлены типичные кривые, характеризующие для одиночного импульса напряжения зависимость среднего давления в камере и инжектируемой массы жидкости $m_{ж}$ от удельной энергии емкости микроактюатора $A_{уд}$, для вышеуказанной совокупности основных параметров устройства.

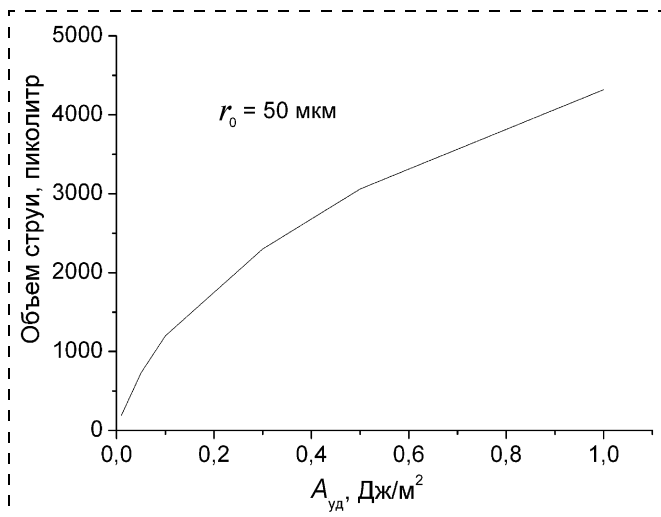


Рис. 4. Зависимость массы микроструи от значения $A_{уд}$, $r_0 = 50$ мкм

При увеличении r_0 масса $m_{ж}$ первоначально растет более чем квадратично (прогиб мембраны возрастает), а начиная с $r_0 = 300$ мкм, — практически квадратично (прогиб мембраны остается почти неизменным).

Давление на выходе сопла возрастает по мере увеличения соотношения R/r_0 — более высокое значение R/r_0 дает также возможность эффективнее нагружать микроактуатор, максимально используя его силу тяги на протяжении всего действия импульса напряжения, при этом для разных R есть свой оптимум скорости $v(t)$ относительно r_0 (рис. 5).

При подаче на образец серии импульсов возможно возникновение резонанса колебаний мембраны. В этом случае эффективность работы микронасоса наибольшая. Резонансный режим имеет место только при достаточно узком соотношении основных параметров устройства. На рис. 6 представлены кривые,

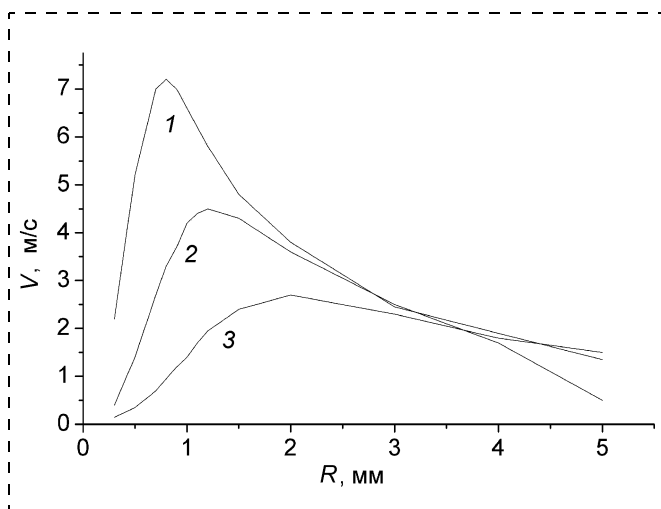


Рис. 5. Изменение скорости микроструи с изменением R для разных r_0 ; кривые 1, 2, 3 соответствуют $r_0 = 50, 100, 200$ мкм

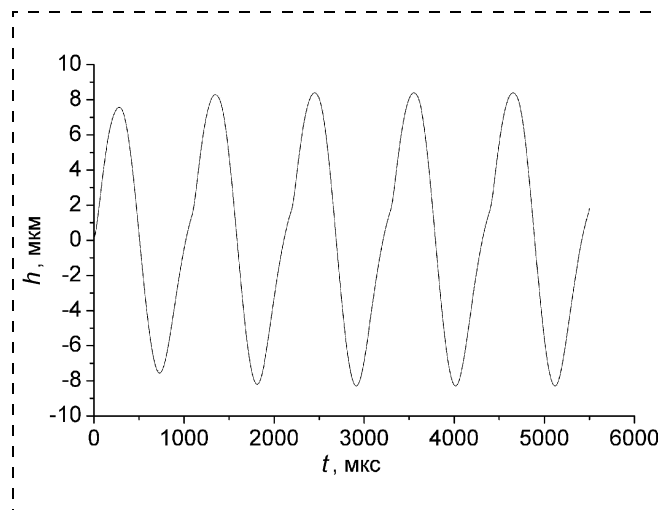


Рис. 6. Изменение во времени амплитуды колебаний центра мембраны в резонансном режиме ($\alpha = 1500$ Н/м; $t_p = 300$ мкс, $t_2 = 800$ мкс)

характеризующие пример резонансного режима работы. На кривых отражены изменения во времени амплитуды колебания мембраны для указанных выше параметров устройства и при $t_p = 300$ мкс, $t_2 = 800$ мкс.

Рассматриваемая колебательная система испытывает действие многократных кратковременных толчков, следующих друг за другом через заданные моменты времени, при этом длительность каждого толчка может в данном случае лежать в диапазоне 10...500 мкс. В такой системе более предпочтительны периодические толчки, при этом каждый следующий толчок может воздействовать на колебательную систему как после полного цикла колебаний, так и после нескольких таких колебаний, при этом с уменьшением длительности импульсов уменьшается только амплитуда колебаний.

Если сдвиг фазы между колебаниями прогиба мембраны и силы тяги микроактуатора значительный, то колебательный процесс имеет характер биеений. При большом затухании колебаний, когда на каждом периоде значительная часть энергии расходуется во внешнюю нагрузку — на движение жидкости, стационарное колебание значительно отличается от синусоидального, это видно из рис. 6.

Оценка значения числа Рейнольдса $Re = u_0 r_0 / \nu$ микроструи, указывающего режим течения при значении коэффициента кинематической вязкости для воды $\nu = 10^{-6}$ м²/с [44], дает значение $Re = 2 \cdot 10^5$, что соответствует турбулентному режиму истечения стационарных струй.

Однако на начальном участке струи, вблизи сопла, течение имеет еще ламинарный характер и турбулизируется лишь на достаточном удалении от сопла, поэтому при малой продолжительности времени истечения микроструи поток вне сопла можно считать ламинарным. Гидродинамические процессы при истечении импульсных затопленных струй в настоящее время хорошо изучены, известно, что при

истечении импульсной струи образуется вихревое кольцо (рис. 7) [45].

Вихревое кольцо формируется из вязкого слоя смещения струи, который сворачивается в тороидальное завихренное ядро вихревого кольца. Формирование этого кольца заканчивается практически сразу после прекращения истечения струи (при $t > t_p$), и далее вихревое кольцо движется вдоль оси симметрии и проходит значительное расстояние, превышающее диаметр выходного сечения струи в десятки раз [45–47].

При решении ряда практических задач возникает необходимость в оценке импульса, действующего на устройство вследствие истечения струи. Этот импульс очевидно равен импульсу, передаваемому вытекающей струей жидкости во внешнем пространстве, а направление импульса, действующего на устройство, противоположно направлению импульса жидкости. Таким образом, задача сводится к расчету приращения импульса в жидкости вне сопла. Отметим, что обычное определение импульса как произведение плотности ρ на объемный интеграл от скорости $\mathbf{K} = \rho \int_V \mathbf{u} dV$ для большинства покоящихся на

бесконечности течений идеальной несжимаемой жидкости оказывается непригодным, так как $\mathbf{K}$ либо не существует, либо равен нулю. Чтобы обойти эти затруднения, Г. Ламб [47] ввел понятие вихревого импульса $\mathbf{P} = \frac{1}{2} \rho \int_V \mathbf{r} \omega dV$, где $\mathbf{r}$ — радиус-вектор;

ω — завихренность (ротор скорости). Вихревой импульс $\mathbf{P}$ имеет размерность импульса и интерпретируется как результирующий импульс внешних сил, необходимый для создания наблюдаемого движения жидкости из состояния покоя. В работе [45] показано, что значение вихревого импульса, полученного жидкостью в результате истечения струи, определяется выражением

$$\mathbf{P} = \frac{\rho \pi R^2}{4} (R/r_0)^2 \int_0^{t_p} u_0^2 dt = \frac{\rho \pi R^2}{4} (R/r_0)^2 \int_0^h u(h) dh,$$

где h — прогиб центра мембраны.

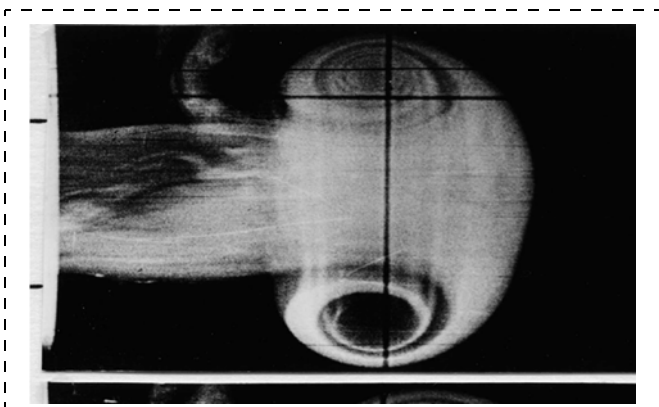


Рис. 7. Пример формирования вихревого кольца при истечении импульсной струи

Этот импульс, передаваемый микроструей жидкости, действует на устройство, из которого струя вытекает, и создает реактивную силу, толкающую устройство в противоположном направлении. Среднее значение реактивной силы тяги F за время истечения струи можно оценить как $F = P/t_p$.

При создании реальных образцов рассматриваемых микронасосов надо учесть, что согласование таких параметров мембраны как ее радиус, толщина и необходимый большой прогиб, определяемый высокой удельной энергоемкостью микроактюатора, делает при $R = 1$ мм достаточно проблематичным ее выполнение из кремния. Например, прогиб центра мембраны с радиусом 1 мм на 10 мкм, силами порядка 0,1–0,3 Н возможен только при ее толщине ~15 мкм.

Поэтому в качестве упругого элемента может быть использована не только сама мембрана, но и кремниевая балка, упругие характеристики которой, например ее жесткость, можно априори оценить. В любом случае подвижным элементом устройства ПП должна быть пластина кремния, на поверхности которой расположена металлическая пленка (лепесток), обеспечивающая при ее электростатическом накате на поверхность сегнетоэлектрика силу тяги F .

Один из примеров конструкции микронасоса представлен на рис. 8, а, в которой упругий элемент представляет собой тонкую кремниевую балку (ее длина ~400...600 мкм, ширина и толщина 50...100 мкм, в зависимости от необходимой жесткости), конец балки при перемещении ПП изгибается на высоту выступа. При изгибе конца балки происходит прогиб центра мембраны. В такой конструкции микронасоса требования к параметрам мембраны могут быть достаточно мягкими — необходимо только обеспечить ее прогиб на заданное значение и возвращение к исходному состоянию.

Другой пример конструкции микронасоса представлен на рис. 8, б, в нем упругий элемент (пружина) — это тонкая пленка бронзы с толщиной несколько микрометров, которая предварительно осаждается на поверхность тонкой кремниевой мембраны с последующим удалением последней методом химического травления. Такая пленка обеспечивает большой прогиб мембраны и достаточную жесткость.

Заключение

Проведенный анализ показал, что использование нового принципа электромеханического преобразования энергии с высокой удельной энергоемкостью 0,1–0,5 Дж/м² и более применительно к созданию устройств формирования микропотоков жидкости, дает возможность, по сравнению с использованием электростатических микроактюаторов с воздушными зазорами, значительно — в 10–100 раз и более, повысить производительность таких устройств, снизить чувствительность параметров микроинжектора к коэффициенту трения при движении подвижного элемента.

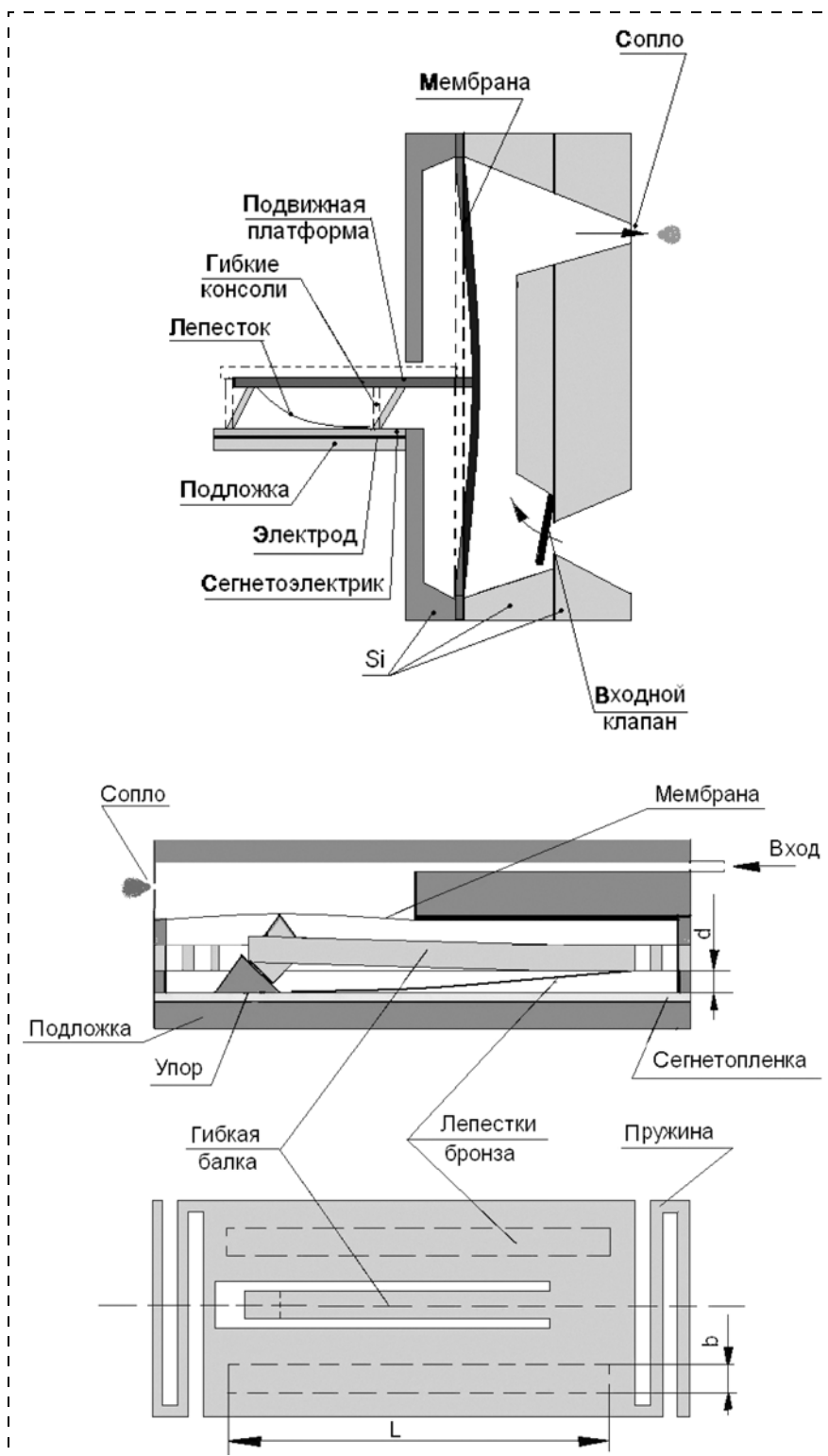


Рис. 8. Схемы конструкции микроинжекторов:

a — упругий элемент — мембрана; *b* — упругий элемент — микробалка из кремния

Установлено, что элементарный микроактюатор с площадью электростатического наката 1 мм^2 способен за один такт длительностью 30... 300 мкс инжектировать микрострую жидкости с массой 1—3 мкг, истекающую со скоростью 1...10 м/с.

Преимущества указанных устройств по сравнению с мембранными микропомпами, построенными на основе пьезоэлектрической керамики, которые используются в струйных головках принтеров, следующие:

- большие силы тяги и больший прогиб мембраны, что определяется большим относительным удлинением при единичном шаге — от 1 мкм на 1 мм длины керамики, до 10...20 мкм на 1 мм длины лепестка;
- микроэлектронная конструкция и технология изготовления;
- большая удельная энергоемкость до 100 Вт/кг и сила тяги $10^3...10^4 \text{ Н/кг}$;
- более гибкое управление, например, возможность управления значением h , варьируя v , M , t_p .

Каждый из вариантов возможного использования рассмотренных формирователей микропотоков жидкости требует разработки конкретной конструкции устройства, в этом вопросе важным фактором является относительная простота изготовления микроактюатора, без привлечения субмикронных технологических норм.

Список литературы

1. Qiao Lin, Bozhi Yang, Jun Xie, Yu-Chong Tai. Dynamic simulation of a peristaltic micropump considering coupled fluid flow and structural motion // J. Micromech. Microeng. 2007. 17. P. 220—228.
2. Taylor M. T., Nguyen P., Ching J., Petersen K. E. Simulation of microfluidic pumping in a genomic DNA blood-processing cassette // J. Micromech. Microeng. 2003. 13. P. 201—208.
3. Munyan J. W., Fuentes H. V., Draper M., Kelly R. T., Woolley A. T. Electrically actuated, pressure-driven microfluidic pumps // Lab on a chip. 2003. 3 (4). P. 217—220.
4. Laser D. J., Santiago J. G. A review of micropumps // J. Micromech. Microeng. 2004. 14. R. 35—64.
5. Nguyen N. T., Huang X. Y., Chuan T. K. MEMS-micropumps: a review // Trans. ASME, J. Fluids Eng. 2002. 124. P. 384—392.
6. Bu X. M., Melvin T., Ensell G., Wilkinson J. S., Evans A. G. R. Design and theoretical evaluation of a novel microfluidic device to be used for Pcr // J. Micromech. Microeng. 2003. 13. P. 125—130.
7. Xie J., Shih J., Lin Q. A., Yang B. Z., Tai Y. C. Surface micromachined electrostatically actuated micro peristaltic pump // Lab Chip. 2004. 4. P. 495—501.
8. Gonzalez U. F., Moussa W. A. Simulation of MEMS piezoelectric micropump for bio-medical applications // 2002

ASME Int. Meek Eng. Conf. & Exp. (IMECE'02) (New Orleans, LA).

9. **Cao L., Mantell S., Polla D.** Design and simulation of an implantable medical drug delivery system using microelectromechanical systems technology // *Sensors Actuators A*. 2001. **94**. P. 117–125.

10. **Teymoori M. M., Abbaspour-Sani E.** Design and simulation of a novel electrostatic peristaltic micromachined pump for drug delivery applications // *Sensors and Actuators A*. 2005. **117**. P. 222–229.

11. **Goldschmidtboing F., Doll A., Heinrichs M., Woias P., Schrag H. J., Hopt U. T.** A generic analytical model for microdiaphragm pumps with active valves // *J. Micromech. Microeng.* 2005. **15**. P. 673–683.

12. **Wang E. N.** et. al. Micromachined jet arrays for liquid impingement cooling of VLSI chips // *Proc. 2002 Solid State Sensor, Actuator, and Microsystems Workshop* (Hilton Head, SC). 2002. 1–4, 27–30 (26–29, 30–33).

13. **Zhang I.** et al. Measurements and modeling of two-phase flow in microchannels with nearly constant heat flux boundary conditions // *J. Microelectromech. Syst.* 2002. **11**. P. 12–19.

14. **Jiang I.** et al. Closed-loop electroosmotic microchannel cooling system for VLSI circuits // *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* 2002. **25**. P. 347–55.

15. **Micci M. M., Ketsdever A. D.** Micropropulsion for Small Spacecraft (Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics). 2000.

16. **Bruschi P., Diligenti A., Piotto M.** Micromachined gas flow regulator for ion propulsion systems // *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 2002. **38**. P. 982–988.

17. **Songmei Yuan, Zhaoying Zhou, Guohui Wang, Changgeng Liu.** MEMS-based piezoelectric array microjet // *Microelectronic Engineering*. 2003. **66**. P. 767–772.

18. **Seitz H., Heinzl J.** Modelling of a microfluidic device with piezoelectric actuators // *J. Micromech. Microeng.* 2004. **14**. P. 1140–1147.

19. **Shifeng Li, Shaochen Chen.** Analytical analysis of a circular PZT actuator for valveless micropumps // *Sensors and Actuators A*. 2003. **104**. P. 151–161.

20. **Kochy M., Evans A. G. R., Brunnschweiler A.** The dynamic micropump driven with a screen printed PZT actuator // *J. Micromech. Microeng.* 1998. **8**. P. 119–122.

21. **Morris C. J., Forster F. K.** Optimization of a circular piezoelectric bimorph for a micropump driver // *J. Micromech. Microeng.* 2000. **10**. P. 459.

22. **Accoto D., Carrozza M. C., Dario P.** Modelling of micropumps using unimorph piezo-electric actuator and ball valves // *J. Micromech. Microeng.* 2000. **10**. P. 277.

23. **Li S. F., Chen S. C.** Analytical analysis of a circular PZT actuator for valveless micropumps // *Sensors and actuators a-physical*. 2003. **104**: (2). P. 151–161.

24. **Park J. H., Yokota S., Yoshida K.** A piezoelectric micropump using resonance drive with high power density // *JSME international journal series c-mechanical systems machine elements and manufacturing*. 2002. **45**: (2). P. 502–509.

25. **Schabmueller C. G. J., Koch M., Mokhtari M. E., Evans A. G. R.** A Brunnschweiler and H Sehr, Self-aligning gas/liquid micropump // *J. Micromech. Microeng.* 2002. **12**. P. 420–424.

26. **Husband B., Bu M., Evans A. G. R., Melvin T.** Investigation for the operation of an integrated peristaltic micropump // *J. Micromech. Microeng.* 2004. **14**. S64–S69.

27. **Bourouina T., Bosseboeuf A., Grandchamp J.-P.** Design and simulation of an electrostatic micropump for drug-delivery applications // *J. Micromech. Microeng.* 1997. **7**. P. 186–188.

28. **Francais O., Dufoury I., Sarrautey E.** Analytical static modelling and optimization of electrostatic micropumps // *J. Micromech. Microeng.* 1997. **7**. — P. 183–185.

29. **Judy J. W.** Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications // *Smart Mater. Struct.* 2001. **10**. P. 1115–1134.

30. **Sameoto D., Hubbard T., Kujath M.** Operation of electrothermal and electrostatic MUMPs microactuators underwater // *J. Micromech. Microeng.* 2004. **14**. P. 1359–1366.

31. **Pan F., Kubby J., Chen J.** Numerical simulation of fluid-structure interaction in a MEMS diaphragm drop ejector // *J. Micromech. Microeng.* 2002. **12**. P. 70–76.

32. **Francais O., Dufour I.** Enhancement of elementary displaced volume with electrostatically actuated diaphragms: application to electrostatic micropumps // *J. Micromech. Microeng.* 2000. **10**. P. 282–286.

33. **Kamisaki S., Fujii M., Takekoshi T., Tezuka C., Atohe M.** A high resolution, electrostatically-driven commercial inkjet head // *Proc. of IEEE MEMS '2000*. P. 793–798.

34. **Jiang T. Y., Ng T. Y., Lam K. Y.** Dynamic analysis of an electrostatic micropump // *Proc. Int. Conf. Modeling and Simulation of Microsystems* (San Diego, CA). 2000. P. 632–635.

35. **Дятлов В. Л., Косцов Э. Г.** Высокоэнергетические микродвигатели на основе тонких сегнетоэлектрических пленок // *Микросистемная техника*. 1999. № 1. С. 22–32.

36. **Dyatlov V. L., Kostsov E. G.** Planar electrostatic micromotors on the basis of the ferroelectric films // *Integrated Ferroelectrics*. 1999. **23**. P. 149–160.

37. **Dyatlov V. L., Kostsov E. G., Baginsky I. L.** High-effective electromechanical energy conversion on the basis of thin ferroelectric films // *Ferroelectrics*. 2000. **241**. P. 99–106.

38. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** High-energy capacitive electrostatic micromotors // *J. Micromech. Microeng.* 2003. **13**. P. 190–200.

39. **Багинский И. Л., Буханец Д. И., Кашеев Э. Л., Косцов Э. Г.** Электростатический двигатель для быстродействующих микромеханических устройств // *Микросистемная техника*. 2004. № 4. С. 2–7.

40. **Kostsov E. G.** Ferroelectric-based electrostatic micromotors with nanometer gaps // *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency Control, Special Issue on Nanoscale Ferroelectric*. 2006. **53**. **12**. P. 2294–2299.

41. **Kostsov E. G., Kolesnikov A. A.** High-speed electrostatic microswitchboards on the basis of ferroelectric films // *Ferroelectrics*. 2007. **351**. P. 138–144.

42. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** High energy output MEMS based on thin layers of ferroelectric materials // *Ferroelectrics*. 2007. P. 69–78.

43. **Косцов Э. Г., Фадеев С. И., Колесников А. А.** Высокоэнергетические микроэлектромеханические коммутаторы // *Нано- и микросистемная техника*. 2007. № 8. С. 57–62.

44. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.

45. **Ахметов Д. Г.** Формирование и основные параметры вихревых колец // *ПМТФ*. 2001. **42**. № 5. С. 70–83.

46. **Бэтчелор Дж.** Введение в гидродинамику жидкости. М.: Мир, 1973. 758 с.

47. **Ламб Г.** Гидродинамика. М.—Л.: ОГИЗ, 1947. 928 с.

Е. А. Мокров, д-р техн. наук, проф.,
Е. М. Белозубов, канд. техн. наук,
Н. Е. Белозубова,
НИИ физических измерений, г. Пенза

МОДЕЛЬ НЕИНФОРМАТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТЕРМОЭДС МЭМС-СТРУКТУР ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУР

Предложена модель неинформативного преобразования термоЭДС в выходной сигнал МЭМС-структур тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления при воздействии нестационарных температур. Показана необходимость учета и компенсации термоЭДС МЭМС-структур при работе тонкопленочных тензорезисторных датчиков в нестационарном температурном режиме.

Тонкопленочные тензорезисторные датчики давления (ТТДД) представляют собой гетерогенные структуры, использующие в качестве чувствительных элементов МЭМС-структуры. Вследствие присущих им преимуществ, важнейшим из которых является оптимальное сочетание высокой устойчивости к воздействию дестабилизирующих внешних воздействующих факторов с хорошими метрологическими характеристиками, они в наибольшей степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым к датчикам давления для изделий ракетной техники. Поэтому ТТДД успешно используются при экспериментальной отработке и штатной эксплуатации практически всех ракетно-космических систем, созданных в эти годы в нашей стране. В то же время эксплуатация серийных ТТДД в составе мощных ЖРД показала, что на очень важных параметрах в результате дестабилизирующего воздействия нестационарных температур, являющегося характерным для двигателей, происходит существенное искажение информации об измеряемом давлении. Учитывая, что характеристики ТТДД в нестационарном температурном режиме во многом определяются характеристиками МЭМС-структур, необходимость их исследования в этом режиме очевидна. При этом целесообразно проводить исследования МЭМС-структур ТТДД нового поколения [1], специально предназначенных для работы в условиях воздействия нестационарных температур.

Наиболее совершенная тонкопленочная МЭМС-структура с минимизированным влиянием неста-

ционарной температуры представлена на рис. 1. Она содержит вакуумированный корпус 1, упругий элемент в виде круглой жесткозашемленной мембраны 2, выполненной как одно целое с основанием 3, на которой расположены соединенные в мостовую схему окружные 4 и радиальные 5 тензорезисторы. Они выполнены в виде соединенных низкоомными перемычками 6 и равномерно размещенных по периферии мембраны идентичных тензоэлементов 7 [2]. Каждый из них касается двумя вершинами 8 границы 9 мембраны. Диэлектрик 10 выполнен в виде тонкопленочной структуры Cr-SiO-SiO_2 , тензоэлементы 7 — в виде структуры X20H75Ю , перемычки 6 — в виде структуры V-Au . Выводные проводники 10 и гермовыводы 11 обеспечивают связь с надсистемой.

На рис. 1, б на 1)–4) изображены соответственно: топология МЭМС-структуры; мембрана, воспринимающая давление и температуру; радиальные и тангенциальные деформации на мембране при воздействии на нее измеряемого давления; распределение температур на мембране в различные моменты времени.

При воздействии давления тензоэлемент окружного тензорезистора (рис. 1, выноска 1) подвергается воздействию растягивающих тангенциальных деформаций ϵ_t , направленных вдоль длины резистора, и сжимающих радиальных деформаций ϵ_r , направленных перпендикулярно длине резистора. Воздействие таких деформаций вызывает увеличение сопротивления тензоэлемента окружного тензорезистора. В результате воздействия растягивающих тангенциальных деформаций, направленных перпендикулярно длине резистора, и сжимающих радиальных деформаций, направленных вдоль длины резистора (выноска 11), сопротивление тензоэлемента радиального тензорезистора уменьшается. Увеличение сопротивлений окружных резисторов и уменьшение радиальных резисторов преобразуется мостовой схемой в электрический сигнал.

Поскольку тензоэлементы идентичны и находятся на периферии мембраны на одинаковом расстоянии от ее центра, то, несмотря на нестационарный характер изменения температуры T_i на планарной стороне мембраны, температуры тензоэлементов окружных и радиальных тензорезисторов, изменяясь, со временем будут одинаковы в каждый момент времени. Одинаковая температура радиальных и окружных тензорезисторов в каждый момент времени вызывает одинаковые изменения сопротивлений тензорезисторов, которые вследствие включения тензорезисторов в мостовую схему взаимно компенсируются.

Рассмотрим структуру (рис. 2) поперечного сечения тензоэлемента окружного и радиального тензо-

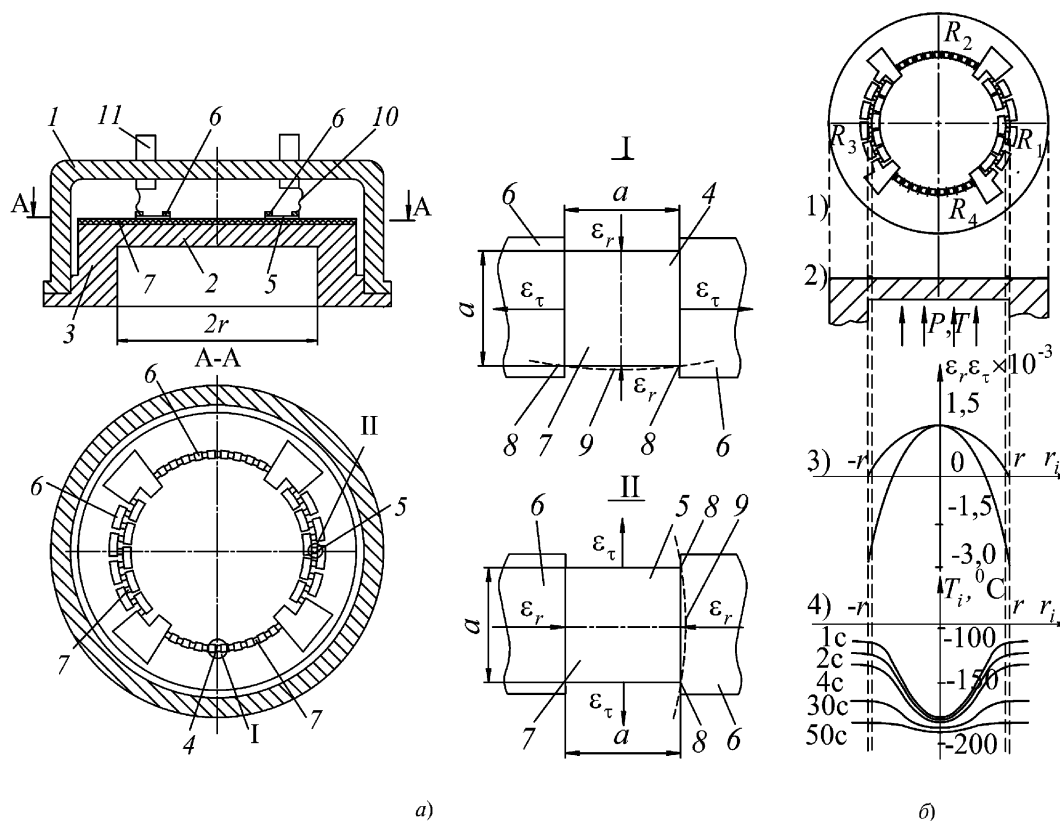


Рис. 1. Модель МЭМС-структуры ТТДД (а), связь размещения тензорезисторов и распределения деформаций от давления ($\epsilon_\tau, \epsilon_r$) и температур (T) в моменты времени 1, 2, 4, 30, 50 с после воздействия нестационарной температуры -196°C (б); a — размер тензоэлемента

резисторов с прилегающими перемычками МЭМС-структуры, изображенной на рис. 1.

Анализируя структуры тензоэлементов окружных и радиальных тензорезисторов, можно отметить, что тензоэлементы как окружных, так и радиальных тензоэлементов образуют с прилегающими перемычками термоэлектрические структуры: "тензорезистивный слой — подслой перемычки" и "подслой перемычки — материал перемычки". Учитывая, что реальное удельное поверхностное сопротив-

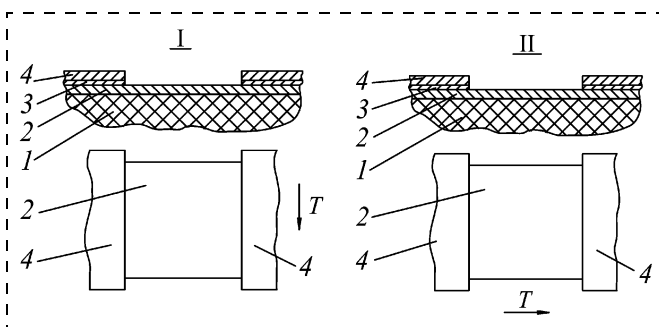


Рис. 2. Структура тензоэлемента окружного (I) и радиального (II) тензорезистора с прилегающими перемычками (1 — диэлектрик $\text{SiO}-\text{SiO}_2$; 2 — тензорезистивный слой X20H75Ю ; 3 — подслои перемычки V ; 4 — материал перемычки Au)

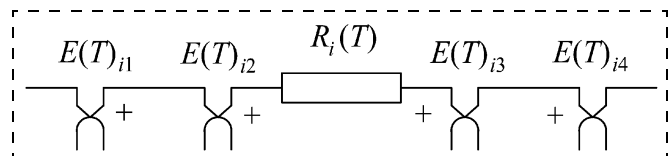


Рис. 3. Термоэлектрическая модель тензоэлемента

ление тензорезисторного слоя существенно больше (не менее чем в 100 раз) удельного поверхностного сопротивления перемычек, термоэлектрическую модель тензоэлемента (окружного или радиального) тензорезистора можно изобразить в виде, приведенном на рис. 3, где $E(T)_{i1}$ — термоЭДС термоэлектрической структуры "основной материал перемычки — подслой перемычки i -го тензоэлемента"; $E(T)_{i2}$ — термоЭДС термоэлектрической структуры "подслой перемычки — тензорезистивный слой i -го тензоэлемента"; $E(T)_{i3}$ — термоЭДС термоэлектрической структуры "тензорезистивный слой — подслой перемычки"; $E(T)_{i4}$ — термоЭДС термоэлектрической структуры "подслой перемычки — основной материал перемычки".

Анализ термоэлектрической модели тензоэлемента показывает, что термоэлектрические структу-

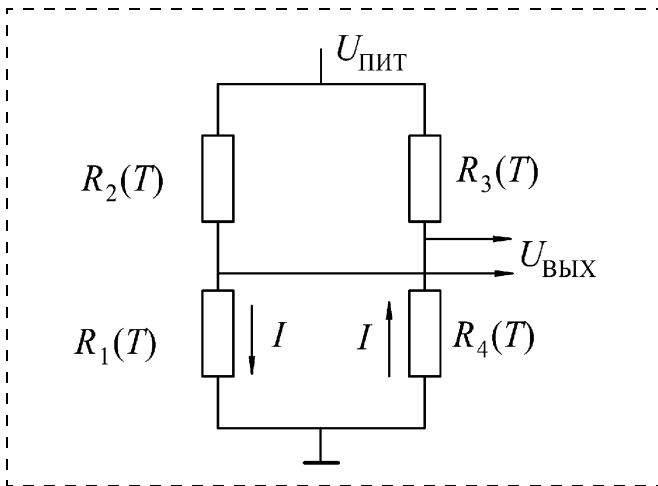


Рис. 4. Упрощенная принципиальная электрическая схема МЭМС-структуры

ры E_{i1} , E_{i2} включены встречно структурам E_{i3} , E_{i4} . При воздействии нестационарной температуры суммарная интегральная термоЭДС i -го тензоэлемента [3–5]

$$E_i(T) = E(T)_{i1} + E(T)_{i2} + E(T)_{i3} + E(T)_{i4} + \int_{T_{\text{ин}}}^{T_{\text{ик}}} \sigma_{\alpha i} dT, \quad (1)$$

где $\sigma_{\alpha i}$ — коэффициент Томсона для материала i -го тензоэлемента; $T_{\text{ин}}$ — температура в начале i -го тензоэлемента; $T_{\text{ик}}$ — температура в конце i -го тензоэлемента. Выражение (1) в сокращенной форме выглядит следующим образом:

$$E_i(T) = \sum_{m=1}^4 E_{im}(T) + \int_{T_{\text{ин}}}^{T_{\text{ик}}} \sigma_{\alpha i} dT, \quad (2)$$

где $E_{im}(T)$ — m -я термоЭДС i -го тензоэлемента.

При воздействии нестационарной температуры суммарная интегральная термоЭДС j -го тензорезистора

$$E_j(T) = \sum_{i=1}^{10} \left[\sum_{m=1}^4 E_{im}(T) + \int_{T_{\text{ин}}}^{T_{\text{ик}}} \sigma_{\alpha i} dT \right]. \quad (3)$$

Определим выходной сигнал тонкопленочного датчика давления в случае воздействия нестационарной температуры при отсутствии напряжения питания измерительного моста ($U_{\text{пит}} = 0$). Упрощенная электрическая схема тонкопленочной МЭМС-структуры приведена на рис. 4. На рис. 4 $R_1(T)$, $R_3(T)$ — радиальные тензорезисторы, $R_2(T)$, $R_4(T)$ — окружные тензорезисторы.

Учитывая, что напряжение питания $U_{\text{пит}} = 0$ и сопротивление нагрузки существенно больше со-

противления тензорезисторов, в соответствии со вторым правилом Кирхгофа можно записать

$$I \sum_{j=1}^4 R_j(T) = \sum_{j=1}^4 E_j(T), \quad (4)$$

где $\sum_{j=1}^4 R_j(T)$ — суммарное сопротивление плеч тензорезистора при конкретной температуре; $\sum_{j=1}^4 E_j(T)$ — суммарная термоЭДС всех тензорезисторов в датчике.

Выходной сигнал мостовой измерительной схемы в общем виде можно записать как

$$U_{\text{вых}}(T) = IR_4(T) + IR_1(T) + E_1(T) + E_4(T) = I[R_4(T) + R_1(T)] + E_1(T) + E_4(T). \quad (5)$$

Определив ток из соотношения (4) и подставляя полученное выражение в формулу (5), получим выражение для выходного сигнала датчика

$$U_{\text{вых}}(T) = \frac{\sum_{j=1}^4 E_j(T)}{\sum_{j=1}^4 R_j(T)} [R_4(T) + R_1(T)] + E_4(T). \quad (6)$$

Подставляя в выражение (6) $E(T)$ из выражения (3), получим

$$U_{\text{вых}}(T) = \frac{\sum_{j=1}^4 \left\{ \sum_{i=1}^{10} \left[\sum_{m=1}^4 E_{jim}(T) + \int_{T_{\text{ин}}}^{T_{\text{ик}}} \sigma_{\alpha ji} dt \right] \right\}}{\sum_{j=1}^4 R_j(T)} [R_4(T) + R_1(T)] + \sum_{i=1}^{10} \left[\sum_{m=1}^4 E_{1im}(T) + \int_{T_{\text{ин}}}^{T_{\text{ик}}} \sigma_{\alpha 1i} dt \right] + \sum_{i=1}^4 \left[\sum_{m=1}^4 E_{4im}(T) + \int_{T_{\text{ин}}}^{T_{\text{ик}}} \sigma_{\alpha 4i} dt \right]. \quad (7)$$

Таким образом, при воздействии нестационарной температуры на тонкопленочную МЭМС-структуру, изображенную на рис. 1, при отсутствии напряжения питания на выходе датчика появляется выходной сигнал, зависящий от термоЭДС 160 термоэлементов, образованных тонкопленочными структурами: "тензорезистивный материал — подслой перемычки (контактной площадки) — контактная площадка", и термоЭДС 40 термоэлементов, образованных 40 тонкопленочны-

ми тензоэлементами, а также от сопротивлений тензорезисторов и их ТКС. Очевидно, что при $i = I$ и $m = M$ выражение примет вид

$$U_{\text{ВЫХ}}(T) = \frac{\sum_{j=1}^4 \left\{ \sum_{i=1}^I \left[\sum_{m=1}^M E_{jim}(T) + \int_{T_{\text{ин}}}^{T_{\text{ик}}} \sigma_{\alpha ji} dt \right] \right\}}{\sum_{j=1}^4 R_j(T)} [R_4(T) + R_1(T)] + \sum_{i=1}^I \left[\sum_{m=1}^M E_{1im}(T) + \int_{T_{\text{ин}}}^{T_{\text{ик}}} \sigma_{\alpha 1i} dt \right] + \sum_{i=1}^I \left[\sum_{m=1}^M E_{4im}(T) + \int_{T_{\text{ин}}}^{T_{\text{ик}}} \sigma_{\alpha 4i} dt \right]. \quad (8)$$

Полученное выражение является математической моделью неинформативного преобразования термоЭДС в выходной сигнал тонкопленочных МЭМС-структур ТТДД с идентичными тензоэлементами. При необходимости из него может быть получено выражение для любых ТТДД с мостовой схемой. Анализ выражения (8) показывает, что $U_{\text{ВЫХ}}(T) = 0$ при выполнении следующих условий:

$$\sum_{j=1}^4 \left\{ \sum_{i=1}^I \left[\sum_{m=1}^M E_{jim}(T) + \int_{T_{\text{ин}}}^{T_{\text{ик}}} \sigma_{\alpha ji} dt \right] \right\} = 0; \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^I \left[\sum_{m=1}^M E_{1im}(T) + \int_{T_{\text{ин}}}^{T_{\text{ик}}} \sigma_{\alpha 1i} dt \right] + \sum_{i=1}^I \left[\sum_{m=1}^M E_{4im}(T) + \int_{T_{\text{ин}}}^{T_{\text{ик}}} \sigma_{\alpha 4i} dt \right] = 0. \quad (10)$$

В идеальной МЭМС-структуре, т. е. в которой тонкопленочные структуры имеют абсолютно идентичные геометрические и физико-химические характеристики при воздействии нестационарного температурного поля, соотношение (9) будет выполняться, так как для окружных тензорезисторов

$$(j = 2, 4) \quad \sum_{m=1}^M E_{im}(T) = 0 \quad \text{вследствие одинаковых}$$

температур идентичных тензоэлементов в любой момент времени. Для радиальных тензорезисторов

$$(j = 1, 3) \quad \sum_{m=1}^M E_{im}(T) \neq 0, \quad \text{но} \quad \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M E_{im}(T) = 0$$

вследствие суммирования термоЭДС встречно включенных идентичных термоэлементов, находящихся при одинаковых температурах.

ТермоЭДС окружных тензоэлементов

$$\int_{T_{\text{ин}}}^{T_{\text{ик}}} \sigma_{\alpha i} dT = 0$$

вследствие равенства $T_{\text{ин}} = T_{\text{ик}}$ (см. рис. 1).

ТермоЭДС радиальных тензоэлементов

$$\sum_{i=0}^I \left(\int_{T_{\text{ин}}}^{T_{\text{ик}}} \sigma_{\alpha i} dt \right) = 0$$

вследствие встречного включения термоЭДС (см. рис. 1). В идеальной МЭМС-структуре при воздействии нестационарной температуры равенство (10) также выполняется всегда в силу вышеназванных причин. Таким образом, если МЭМС-структура, изображенная на рис. 1, изготовлена без нарушений геометрических и физико-химических характеристик (идеальная структура), то выходной сигнал при воздействии на него нестационарной температуры будет равен нулю при $U_{\text{пит}} = 0$.

Так как при реальном формировании тензочувствительной схемы всегда допускаются некоторые отклонения геометрических характеристик (формы, размеров элементов тензосхемы, их взаимного расположения и расположения относительно элементов конструкции) и отклонения физико-химических характеристик элементов тензосхемы, приводящие к появлению разницы в характеристиках тензоэлементов (в частности, термоэлектрических неоднородностей в тензоэлементах), то выходной сигнал с датчика при воздействии на него нестационарной температуры (при отсутствии напряжения питания) не будет равен нулю.

Совершенно естественно, что при системном характере отклонений геометрических и физико-химических характеристик выходной сигнал с МЭМС-структуры одного конструктивного исполнения при воздействии нестационарной температуры будет иметь одинаковый характер. При бессистемном, случайном характере этих отклонений в разных экземплярах МЭМС-структур одного конструктивного исполнения выходной сигнал будет иметь индивидуальный характер для каждой конкретной структуры даже одной и той же конструкции. Таким образом, выходной сигнал МЭМС-структуры при воздействии на нее нестационарной температуры при отсутствии напряжения питания может быть критерием стабильности и качества ее изготовления. Кроме того, индивидуальный характер выходного сигнала каждой конкретной МЭМС-структуры при воздействии нестационарной температуры требует индивидуальной компенсации выходного сигнала конкретной МЭМС-структуры. При этом наиболее предпочтительными методами компенсации, по-видимому, являются

методы с использованием специально введенных в МЭМС-структуры компенсационных термоэлектрических структур.

Список литературы

1. Мокров Е. А., Белозубов Е. М. Тонкопленочные тензорезисторные датчики давления нового поколения ДАВ084, ДАВ085, Вт206.1А, Вт206Б, Вт212А1, ДАВ092 для авиационной и ракетной техники // 4-я междунар. конф. "Авиация и космонавтика — 2005". 10—13 окт. 2005 г. Москва. Тез. док. М.: Изд-во МАИ, 2005. С. 100.

2. Белозубов Е. М. Патент РФ № 1615578 5G01L 9/04. Датчик давления. Заявка № 4492365/24-10 от 10.10.88. Опубл. 23.12.90. Бюл. № 47.

3. Гордов А. Н. Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992.

4. Куинн Т. Температура: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 448 с.

5. Белевцев А. В., Богатов В. В., Коржавин А. В. и др. Термоэлектрические преобразователи температуры. Теория, практика, развитие / Под общ. ред. А. В. Каржавина. Обнинск: Тесей, 2003. 56 с.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.383

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

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМОННО-РЕЗОНАНСНЫХ БИОСЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ СУБМИКРОННЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

Рассмотрены биосенсоры на основе эффекта плазмонного резонанса в субмикронных дифракционных решетках. Методом строгого анализа связанных волн RCWA проведена оценка их чувствительности и разрешающей способности регистрации изменений показателя преломления.

Плазмонно-резонансные биосенсорные микросистемы

В оптических датчиках для детектирования различных химико-биологических реагентов в последние годы используют эффект плазмонного резонанса [1].

В настоящей работе, исходя из цели практического создания высокочувствительной сенсорной системы рассматриваются варианты и особенности использования эффекта плазмонного резонанса в субмикронных дифракционных решетках.

В биосенсорной системе, использующей особенности возбуждения плазмонной волны в дифракционной решетке, регистрируются биомолекулярные

взаимодействия на поверхности решетки, помещенной внутри канала, через который пропускается исследуемый раствор (рис. 1, а). Возбуждение плазмонной волны на поверхности дифракционной решетки при определенном (резонансном) угле падения ТМ-волны сопровождается уменьшением коэффициента отражения нулевого порядка дифракции практически до нуля. Фотоприемным устройством на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС-камерой) регистрируется сдвиг резонансного угла, соответствующего изменению параметров исследуемого раствора. По сравнению с датчиками, использующими плазмонный резонанс в призмной схеме возбуждения [2], в схеме с решеткой значительно легче осуществляется многоканальный режим и в целом вся схема для промышленного исполнения проще и, вероятно, дешевле. Для сенсорных микросистем представляется эффективным использовать дифракционные структуры не только с одномерной, но и двумерной периодичностью.

Методика строгого волнового расчета дифракционной картины металлодиэлектрических решеток

Для расчета применен строгий анализ связанных волн RCWA (*rigorous coupled-wave analysis*) [3], позволяющий анализировать дифракцию поперечно-поляризованных ТЕ-, ТМ-волн и гибридных волн в металлодиэлектрических решетках общего вида. Построение картины дифракции волн в двумерном случае основано на разложении диэлектрической проницаемости, компонентов электрического и магнит-

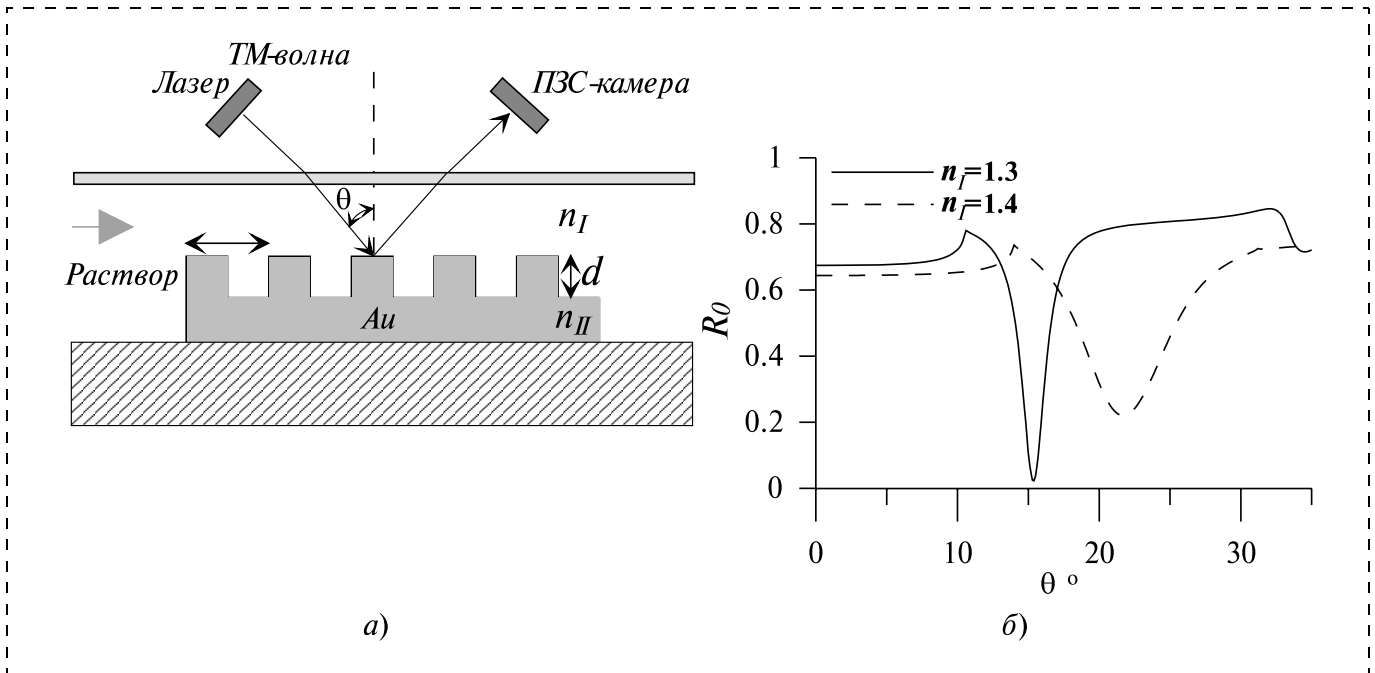


Рис. 1. Схематический вид плазменной биосенсорной системы с бинарной дифракционной решеткой (а) и зависимость коэффициента отражения нулевого порядка дифракции от угла падения плоской ТМ-волны (б). Параметры решетки: $\Lambda = 0,8$ мкм; $d = 0,05$ мкм; длина волны $\lambda = 0,85$ мкм

ного полей в области решетки на пространственные гармоники:

$$\begin{aligned} \varepsilon(x) &= \sum_{h=-N/2}^{h=N/2} \varepsilon_h \exp\left(j \frac{2\pi h}{\Lambda} x\right); \\ H_y(x) &= \sum_{i=-N/2}^{i=N/2} U_i \exp(j k_{xi} x); \\ E_x(x) &= j \frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \sum_{i=-N/2}^{i=N/2} S_i \exp(j k_{xi} x), \end{aligned}$$

где $k_{xi} = k_0 [n_I \sin(\theta) - i(\lambda/\Lambda)]$; λ , Λ , θ — длина волны оптического излучения, период решетки и полярный угол падения, соответственно; n_I — показатель преломления покровной среды; $k_0 = 2\pi/\lambda$; N — число гармоник разложения. Для бинарной дифракционной решетки пространственные гармоники проницаемости имеют вид:

$$\varepsilon_0 = f n_I^2 + (1-f) n_{II}^2; \quad \varepsilon_h = (n_I^2 - n_{II}^2) \sin(\pi h f) / \pi h,$$

где n_I , n_{II} — показатели преломления покровной среды и материала решетки; f — коэффициент заполнения материалом в области решетки.

На первом этапе методики решается система дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial (z')^2} = [\mathbf{E}\mathbf{B}] \mathbf{U},$$

в которой введена нормированная пространственная координата $z' = k_0 z$, вектор $\mathbf{U}$ состоит из амплитуд спектрального разложения магнитного поля $\{U_i\}$, матрица $\mathbf{B}$ определяется как $\mathbf{B} = \mathbf{K}_x \mathbf{E}^{-1} \mathbf{K}_x - \mathbf{I}$. Матрица $\mathbf{E}$ имеет вид матрицы Топлица, элементы рассчитываются по амплитудам гармоник спектрального представления проницаемости: $\{E_{ip}\} = \varepsilon_{i-p}$. Диагональная матрица $\mathbf{K}_x$ имеет элементы $\{k_{xi}/k_0\}$; $\mathbf{I}$ — единичная диагональная матрица. При решении системы уравнений находятся все собственные значения и собственные вектора матрицы $\mathbf{E}\mathbf{B}$, которые представляются в форме диагональной матрицы $\mathbf{Q} = \{q_i\}$ (q_i — собственные значения) и соответствующей ей матрицы, образованной столбцами собственных векторов $\mathbf{W} = \{w_m, i\}$.

Далее путем применения условий непрерывности на границе решетки и окружающих ее сред определяется система линейных уравнений, по которой рассчитываются эффективности отражения и пропускания для разных порядков дифракции:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{I} & \mathbf{W} & \mathbf{W}\mathbf{X} & [0] \\ j\mathbf{Z}_I & \mathbf{V} & -\mathbf{V}\mathbf{X} & [0] \\ [0] & -\mathbf{W}\mathbf{X} & -\mathbf{W} & \mathbf{I} \\ [0] & -\mathbf{V}\mathbf{X} & \mathbf{V} & j\mathbf{Z}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{C}^+ \\ \mathbf{C}^- \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\delta_{i0}] \\ [\delta_{i0} \cos(\theta)/n_I] \\ [0] \\ [0] \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{Z}_I$, $\mathbf{Z}_{II}$ — диагональные матрицы с коэффициентами $((k_0^2 n_I^2 - k_{xi}^2)^{1/2} / k_0 n_I^2, (k_0^2 n_{II}^2 - k_{xi}^2)^{1/2} / k_0 n_{II}^2)$; матрица $\mathbf{V} = \mathbf{W}\mathbf{Q}$; матрица $\mathbf{X}$ — диагональная матрица

ца, состоящая из элементов $\{\exp(-k_0 q_i d)\}$, d — толщина решетки; δ_{i0} — дельта-функция; векторы $\mathbf{R} = \{R_i\}$ и $\mathbf{T} = \{T_i\}$ — коэффициенты отражения и пропускания различных порядков дифракций; C^+ , C^- — коэффициенты разложения амплитуд $\{U_i\}$ и $\{S_i\}$.

Описание примененной в работе для части расчетов трехмерного варианта методики RCWA, учитывающего азимутальную зависимость падающей плоской волны, ввиду громоздкого математического описания, опущено.

Расчет параметров плазмонно-резонансных датчиков на основе дифракционных решеток

Были рассмотрены металлические дифракционные решетки прямоугольного и синусоидального профиля. Для возбуждения плазмонных волн требуется, чтобы на рабочей длине волны действительная часть диэлектрической проницаемости металла была меньше нуля: $\text{Re}(\epsilon_m) < 0$. Исходя из конкретных численных значений проницаемости, наиболее подходящим материалом следует считать золото и серебро. Расчеты проводились для золота; рабочие длины волн соответствовали части видимого (более 0,6 мкм) и ближнего ИК-диапазона. Дисперсия металла учитывалась согласно модели Друде.

Основные положения расчетов сводятся к вычислению дифракционной эффективности отражения ТМ-поляризованных волн при вариации полярного,

азимутального углов падения и длины волны излучения.

На рис. 1, б представлена зависимость коэффициента отражения нулевого порядка дифракции бинарной решетки от угла падения плоской ТМ-волны. Параметры решетки: период $\Lambda = 0,8$ мкм, толщина $d = 0,05$ мкм; длина волны $\lambda = 0,85$ мкм. На рис. 2, а приведен схематический вид дифракционной решетки с синусоидальным профилем и на рис. 2, б представлена угловая зависимость коэффициента отражения нулевого порядка дифракции. Параметры решетки: $\Lambda = 1,6$ мкм, $d = 0,11$ мкм; длина волны $\lambda = 0,63$ мкм. По обоим графикам видно, что при резонансном угле происходит эффективное возбуждение плазмонной ТМ-волны, коэффициент отражения резко уменьшается и при показателе преломления покровной среды 1,3 мкм является близким к нулю. Изменение показателя преломления приводит к смещению резонансного угла возбуждения плазмонов и изменению формы угловой зависимости коэффициента отражения.

Интересным и важным является факт линейной зависимости смещения угла и длины волны возбуждения плазмонной волны от изменения показателя преломления покровной среды в диапазоне 1,3...1,37 (рис. 3), полученный по данным рис. 1, б и рис. 2, б.

Чувствительность при регистрации углового смещения минимума коэффициента отражения $\Delta\theta/\Delta n_f$,

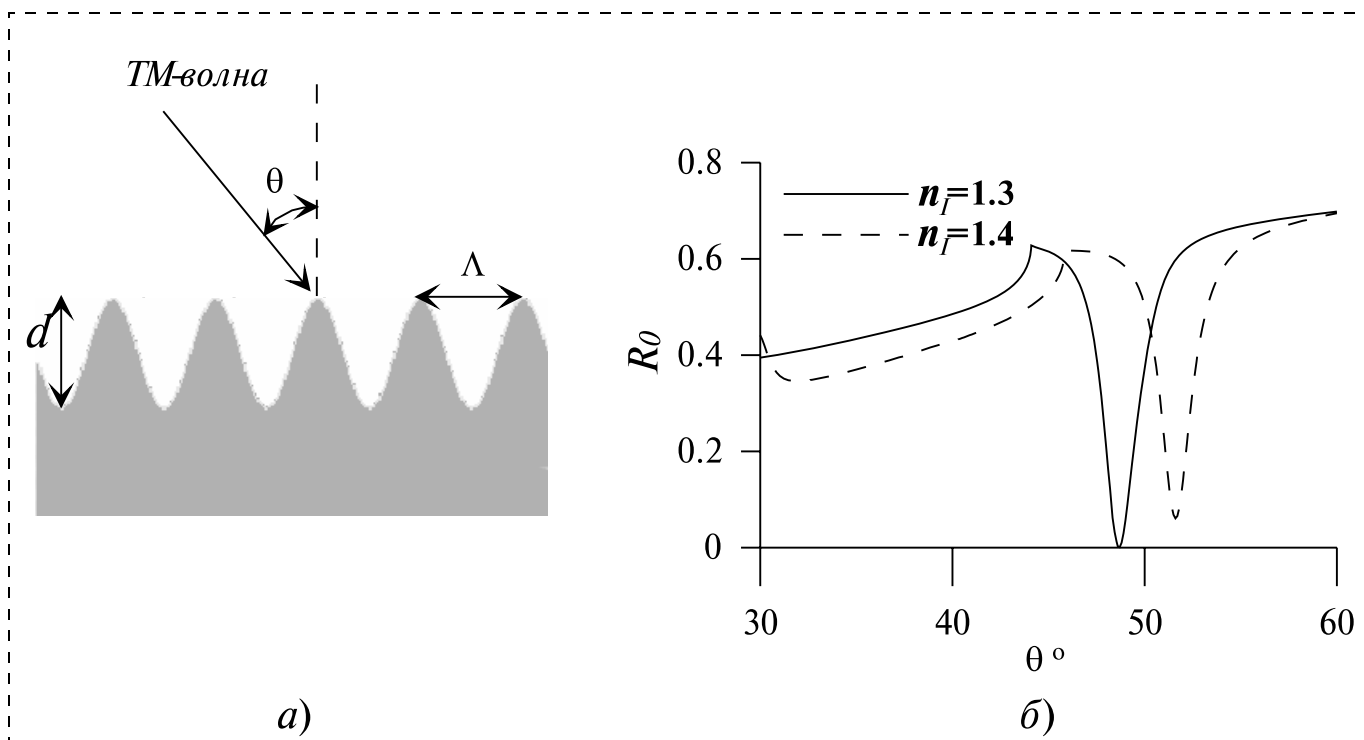


Рис. 2. Схематический вид дифракционной решетки с синусоидальным профилем (а) и зависимость коэффициента отражения нулевого порядка дифракции от угла падения плоской ТМ-волны (б). Параметры решетки: $\Lambda = 1,6$ мкм; $d = 0,11$ мкм; длина волны $\lambda = 0,63$ мкм

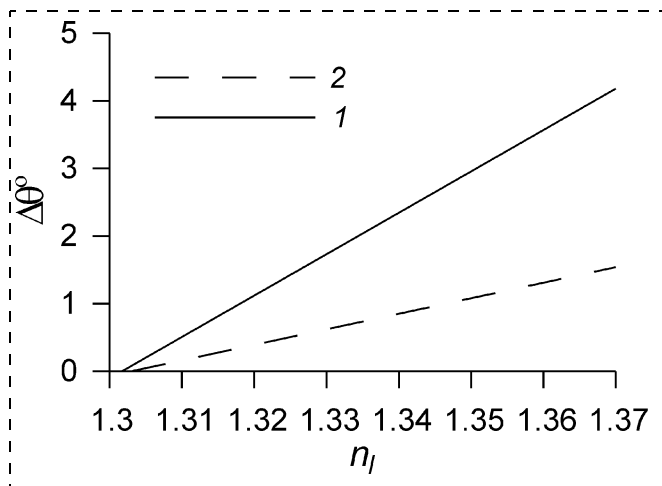


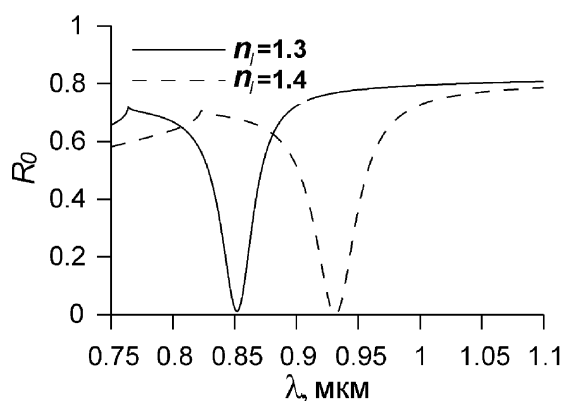
Рис. 3. Зависимость сдвига угла падения, соответствующего минимальному коэффициенту отражения при возбуждении плазмонной волны, от показателя преломления покровной среды для бинарной (кривая 1) и синусоидальной (кривая 2) дифракционных решеток, соответственно

измеряемая в градусах на единицу показателя преломления (ЕПП) составляет 61 и 23°/ЕПП для бинарной и синусоидальной решеток, соответственно. Чувствительность в пределах регистрируемого диапазона показателей преломления различных растворов является для обоих типов решеток постоянной величиной. Следует отметить, что чувствительность в схеме призмного возбуждения плазмонной волны на плоской металлической пленке при аналогичных условиях (тот же тип металла, рабочая длина волны и регистрируемый диапазон изменения показателя) составляет по нашим расчетам 106°/ЕПП.

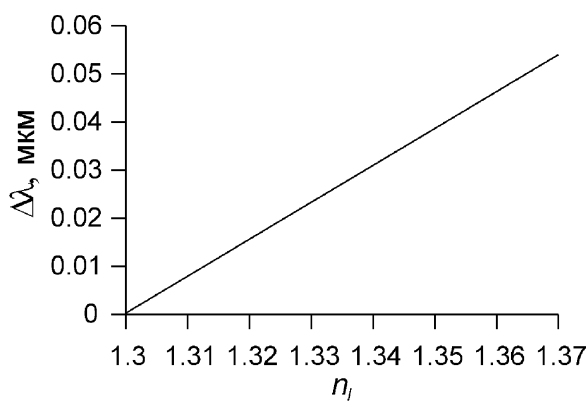
На рис. 4, а показана спектральная зависимость коэффициента отражения нулевого порядка дифракции от длины ТМ-волны для решетки с прямоугольным профилем при вариации показателя преломления покровной среды как параметра. Чувствительность при регистрации спектрального смещения $\Delta\lambda/\Delta n_f$ составляет для бинарной решетки с указанными выше характеристиками 0,77 мкм/ЕПП, и также в диапазоне водных растворов является постоянной величиной. На рис. 4, б показано смещение длины волны относительно значения 0,85 мкм.

Реалистичная схема падения плоской волны на дифракционную решетку в трехмерном пространстве показана на рис. 5, а. Азимутальная зависимость коэффициента отражения ТМ-волны нулевого порядка дифракции, т. е. зависимость коэффициента отражения от угла θ при вариации угла по азимуту ψ , как параметра, рассчитанная методом RCWA, показана на рис. 5, б. Видно, что жестких требований к юстировке оптической схемы сенсора не выдвигается и отклонение от нулевого угла по азимуту не сопровождается резким ухудшением эффективности возбуждения плазмонов.

Известно [4], что для сенсорных схем с призмной системой возбуждения плазмонов на плоской пленке металла фотометрия допускает возможность детектирования изменения показателя преломления $1 \cdot 10^{-6}$ в предположении регистрации углового разрешения $1 \cdot 10^{-4}^\circ$ при чувствительности 100°/ЕПП. Если использовать эти данные, то можно констатировать, что рассмотренная схема на основе бинарной дифракционной решетки на длине волны 0,85 мкм имеет разрешающую способность порядка $2 \cdot 10^{-6}$.



а)



б)

Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения нулевого порядка дифракции от длины ТМ-волны для решетки с прямоугольным профилем (а) и зависимость сдвига длины волны, соответствующего минимальному коэффициенту отражения, от показателя преломления покровной среды (б)

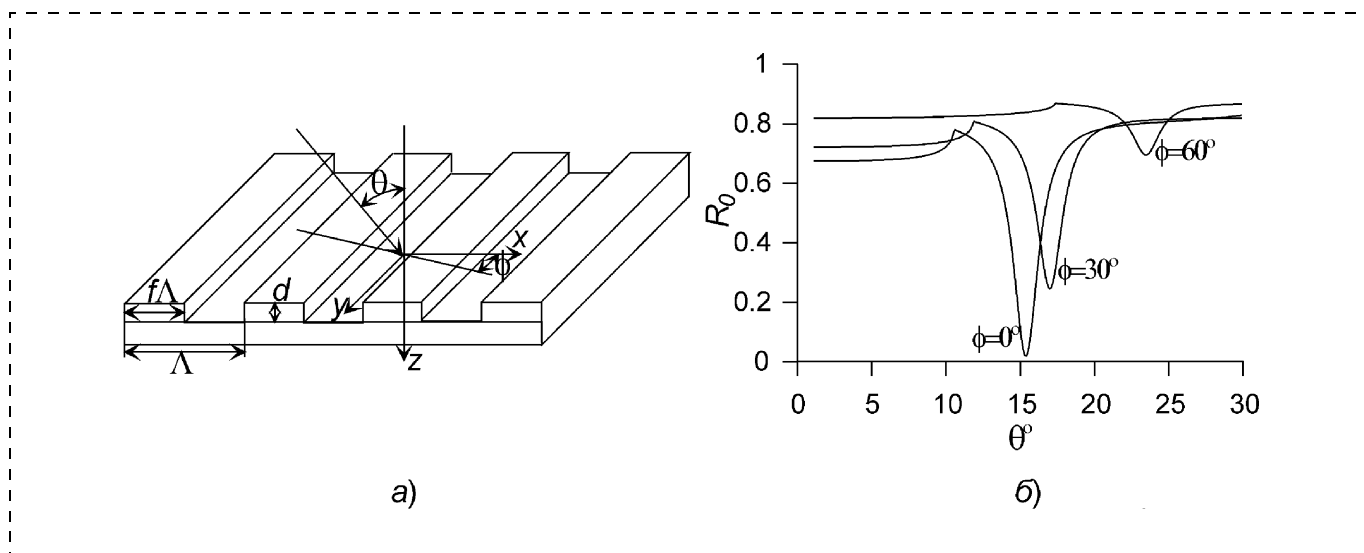


Рис. 5. Внешний вид решетки с прямоугольным профилем в трехмерном пространстве (а) и зависимость коэффициента отражения нулевого порядка дифракции от полярного угла падения θ ТМ-волны при вариации азимутального угла ϕ как параметра (б)

Исходя из спектральной разрешающей способности в 0,05 нм, разрешающая способность измерения изменений показателя преломления по смещению дифракционной картины вследствие вариации длины волны составит $5 \cdot 10^{-5}$.

Таким образом, субмикронные металлические дифракционные решетки с прямоугольным профилем могут иметь параметры сенсорных элементов, сопоставимые с параметрами оптических рефрактометрических сенсоров на основе призмленного возбуждения плазмонов. Можно увеличить разрешающую способность при детектировании малых изменений оптической плотности среды за счет применения специальных приемов фотометрии, радиоэлектронных схем фильтрации, синхронного детектирования и т. п.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Краснодарского края (грант № 06-02-96640-р_юг_а).

Список литературы

1. **Surface plasmon resonance based sensors** / Ed. J. Homola. New-York: Springer, 2006.
2. **www.biocore.com**
3. **Moharam M. J., Grann E. B., Pommet D. A.** Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings // J. of the Optical Society of America, A. 1995. 12. N 5. P. 1068—1076.
4. **Liedberg B., Nylander C., Lungstrom I.** Biosensing with surface plasmon resonance — how it all started // Biosensors and Bioelectronics. 1995. 10. N 8. P. i—ix.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 532.536.248

И. А. Хорунжий, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Д. С. Доманевский, д-р физ.-мат. наук, проф., **Д. С. Бобученко**, канд. физ.-мат. наук,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск
E-mail: igor.khorunzhii@newmail.ru

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИАТОРА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ МОЩНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА

Рассмотрена компьютерная модель теплового радиатора для мощного полупроводникового прибора (~1 кВт тепловой мощности), разработанная с помощью коммерческого компьютерного пакета ABAQUS [1]. Исследовано влияние параметров радиатора на тепловое сопротивление системы. Обсуждаются возможности повышения эффективности охлаждения.

Для многих технических устройств выделение теплоты во время работы может служить серьезной причиной снижения надежности и выхода из строя. Тепловыделение современных больших интегральных схем растет от поколения к поколению, это приводит к значительному росту плотности тепловых потоков, которые необходимо отводить от прибора при его работе. Вместе с тем, ввиду резкого снижения размеров самих приборов ужесточаются требования к тепловым режимам, в рамках которых они должны функционировать. Все это приводит к тому, что проблема охлаждения микроэлектронных устройств и обеспечения температурных режимов их эксплуатации становится одним из главных условий дальнейшего развития микроэлектроники.

В настоящее время для решения этой проблемы используются эффективные тепловые радиаторы игольчатого и пластинчатого типа с вынужденной конвекцией охлаждающей жидкости или газа [2–3]. В то же время разработка эффективного теплового радиатора — сложная техническая задача вследствие сложной геометрии

устройства и наличия большого числа параметров, влияющих на эффективность его работы. Экспериментальная оптимизация параметров радиатора сопряжена с большими материальными и временными затратами вследствие необходимости проведения большого объема экспериментальных исследований для радиаторов с разной геометрией и изготовленных из разных материалов.

С помощью компьютерного моделирования оптимизация параметров радиатора может быть выполнена в значительно более короткие сроки и с меньшими материальными затратами, так как в компьютерной модели легко изучить влияние каждого параметра на эффективность системы охлаждения. В литературе нам удалось найти лишь очень ограниченное число работ, посвященных компьютерному моделированию тепловых радиаторов с естественной [4] и вынужденной [5, 6] конвекцией. В указанных работах модели радиаторов базируются на разработанных авторами компьютерных программах, и их повторение представляет большую сложность. В настоящей работе представлена

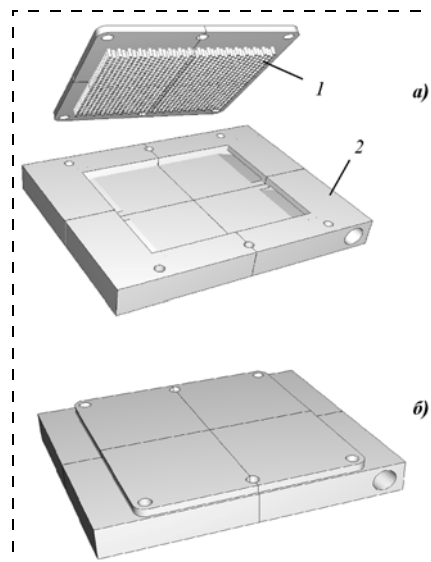


Рис. 1. Сгенерированный компьютерной программой внешний вид системы охлаждения: в разобранном (а) и собранном (б) виде:

1 — игольчатый радиатор; 2 — корпус

компьютерная модель игольчатого радиатора с жидкостным охлаждением, разработанная с помощью коммерческого программного пакета ABAQUS, поэтому она может быть достаточно легко воспроизведена опытным пользователем пакета ABAQUS, а также любого другого аналогичного пакета.

Внешний вид охлаждающего устройства, сгенерированный компьютерной программой, представлен на рис. 1. Охлаждающее устройство используется для охлаждения мощного полупроводникового прибора с рассеиваемой тепловой мощностью ~1 кВт, оно состоит из двух основных частей: игольчатого радиатора и корпуса с имеющимися в нем каналами для прокачки охлаждающей жидкости. Для первоначального расчета выбран вариант, в котором радиатор изготовлен из AlN керамики с высокой теплопроводностью (~180 Вт/(м·К)). Радиатор представляет собой пластину размером 137 × 127 × 5 мм. На нижней стороне пластины

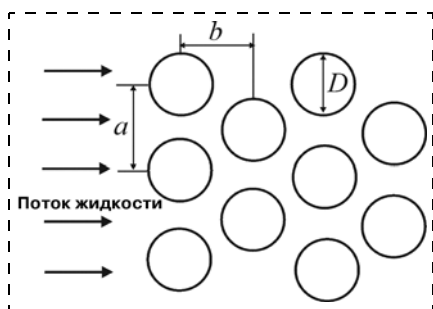


Рис. 2. Схема расположения иглол на радиаторе и характерные геометрические размеры, используемые при расчетах

имеется 928 иглол, расположенных в шахматном порядке на площади $95,6 \times 108$ мм. Схема расположения иглол и характерные геометрические параметры представлены на рис. 2. Длина иглол в описываемом варианте радиатора составляет 6 мм, их диаметр $D = 2,4$ мм у основания и 1,8 мм на конце иглолки, параметры a и b равны соответственно 3,586 мм и 3,106 мм.

Тепловой радиатор устанавливается на корпус с каналами, причем напротив иглол в корпусе имеется углубление размером $96 \times 108,5 \times 6,5$ мм; это углубление посредством каналов соединяется с впускным и выпускным отверстиями, через которые поступает и отводится охлаждающая жидкость. Корпус изготавливается из специального пластика, теплопроводность которого мала и составляет $0,29$ Вт/(м · К). В рабочем состоянии все каналы и внутренние объемы охлаждающего устройства заполнены движущейся охлаждающей жидкостью, поэтому основным физическим механизмом отвода теплоты от радиатора является вынужденная конвекция.

Вся компьютерная модель в рассматриваемом примере включает в себя около 415 000 конечных элементов, и для проведения расчетов требуется как минимум 675 Мбайт оперативной памяти (оптимальный размер памяти составляет 1,42 Гбайт). Для проверки качества используемой конечно-элементной сетки были проведены расчеты для модели с более мелкой сеткой, в которой число элементов было увеличено примерно в 1,5 раза и составляло около 600 000 элементов. Существен-

но более подробная сетка была сгенерирована для иглол, как наиболее мелких элементов теплового радиатора. Расчетные температуры, полученные в расчетах с обычной и более подробной сетками, различались не более чем на $0,08$ °С.

Как уже отмечалось выше, основной теплообмен в охлаждающем устройстве обусловлен вынужденной конвекцией. Моделирование теплообмена между твердой поверхностью и текущей жидкостью можно описать с помощью закона Ньютона для теплообмена [7, 8]:

$$q = h(T_w - T_f), \quad (1)$$

где q — плотность потока теплоты с поверхности твердого тела в жидкость; h — коэффициент теплообмена; T_w , T_f — температура поверхности твердого тела и локальная температура охлаждающей жидкости соответственно.

Локальную температуру жидкости T_f можно рассчитать, добавив к начальной температуре жидкости на входе в систему охлаждения прирост, обусловленный поступлением в жидкость теплоты, отводимой от охлаждаемой поверхности к рассматриваемому элементу, объема жидкости на пути его движения от входного отверстия до рассматриваемой точки:

$$T_f = T_0 + \frac{Q}{V\rho c_p}, \quad (2)$$

где V — объемная скорость прокачки жидкости; ρ — плотность жидкости; c_p — удельная теплоемкость жидкости при постоянном давлении.

Наиболее сложной проблемой является вычисление коэффициента теплообмена h .

Этот коэффициент зависит от многих параметров, таких как объемная скорость движения, вязкость и плотность жидкости, характер течения (ламинарное или турбулентное), характерные геометрические размеры системы и т. д. В нашей модели для расчета коэффициента h использовалась формула [7]

$$h = \frac{Nu_f \lambda}{D}, \quad (3)$$

где Nu_f — число Нуссельта; λ — теплопроводность жидкости; D —

диаметр иглол (см. рис. 2). Для вычисления числа Нуссельта Nu_f использовалась феноменологическая формула [8, 9]

$$Nu_f = Ca \left(\frac{a}{b} \right)^{0,2} \times \times Re_f^{0,60} Pr_f^{0,36} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

здесь a и b — характерные геометрические параметры теплового радиатора (см. рис. 2); Re и Pr — числа Рейнольдса и Прандтля соответственно. Индексы f и w указывают, какую температуру (жидкости (f) или твердой стенки (w)) следует использовать для вычисления чисел Рейнольдса и Прандтля. Как отмечается в [8], множитель $\left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}$ позволяет коррект-

но учесть изменение вязкости жидкости в контактном слое.

Теплообмен имеет различную эффективность для различных рядов иглол. Изменение этой эффективности учитывает множитель C , зависимость которого от номера ряда представлена на рис. 3 [9]. Множитель α имеет значения 0,1 для плоских поверхностей и 0,35 для цилиндрических или конических поверхностей [8, 9]. Соотношение (4) справедливо при значениях числа Рейнольдса $100 < Re < 2 \cdot 10^5$.

Для вычисления коэффициента h была написана подпрограмм на алгоритмическом языке Fortran-90, которая позволяет вычислять локальные значения коэффициента h в каждой точке контактной поверхности стенка—жидкость с учетом локальных температур твердой поверхности и охлаж-

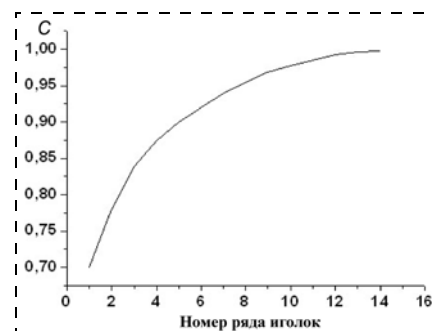


Рис. 3. Зависимость коэффициента C в соотношении (4) от номера ряда иглол [11]

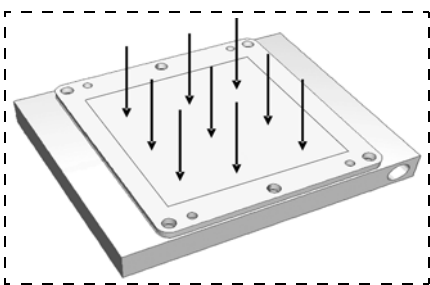


Рис. 4. Схема распределения теплового потока на верхней поверхности теплового радиатора

дающей жидкости. В качестве граничных условий мы использовали температуру охлаждающей жидкости на входе в систему охлаждения T_0 и тепловой поток, равномерно распределенный по площади 100×110 мм, расположенной на верхней стороне теплового радиатора точно напротив области, покрытой иглами. На рис. 4 представлено охлаждающее устройство в собранном виде и схематично

показана область, по которой распределен тепловой поток.

На рис. 5 представлены результаты компьютерного моделирования для системы охлаждения со следующими параметрами: тепловая мощность $P = 1$ кВт и равномерно распределена на площади 100×110 мм (см. рис. 4), объемная скорость прокачки охлаждающей жидкости $V = 5$ л/мин, теплопроводность материала радиатора 180 Вт/(м · К), теплопроводность материала корпуса $0,29$ Вт/(м · К), начальная температура охлаждающей жидкости на входе в систему 20 °С. В качестве охлаждающей жидкости рассматривался антифриз фирмы *Clariant* (Германия) [10], состоящий из гликоля (44 %) и воды (56 %). Все приведенные результаты получены для стационарного режима.

Максимальная температура, достигнутая на верхней поверхности теплового радиатора, составила

в описанном варианте $31,4$ °С. Средняя температура, рассчитанная на площади, через которую поступает тепловой поток, равнялась $29,55$ °С. Температура охлаждающей жидкости на выходе из системы охлаждения составила $23,25$ °С. Для общей характеристики системы охлаждения рассчитывалось тепловое сопротивление системы охлаждения TR по формуле

$$TR = \frac{T^* - T_0}{P}. \quad (5)$$

Здесь T^* — температура верхней поверхности теплового радиатора; T_0 — начальная температура охлаждающей жидкости; P — полная тепловая мощность, рассеиваемая радиатором.

Рассчитывалось два значения теплового сопротивления:

- в качестве T^* использовалась максимальная расчетная температура на верхней стороне теплового радиатора;
- в качестве T^* использовалась средняя температура верхней стороны радиатора, рассчитанная для площади, по которой распределен тепловой поток.

Эти тепловые сопротивления, рассчитанные для описанного выше варианта системы охлаждения, составили $1,14 \cdot 10^{-2}$ и $9,55 \cdot 10^{-3}$ К/Вт соответственно.

На рис. 6 представлена зависимость теплового сопротивления от объемной скорости прокачки охлаждающей жидкости. Из приведенных результатов видно, что тепловое сопротивление существенно зависит от объемной скорости

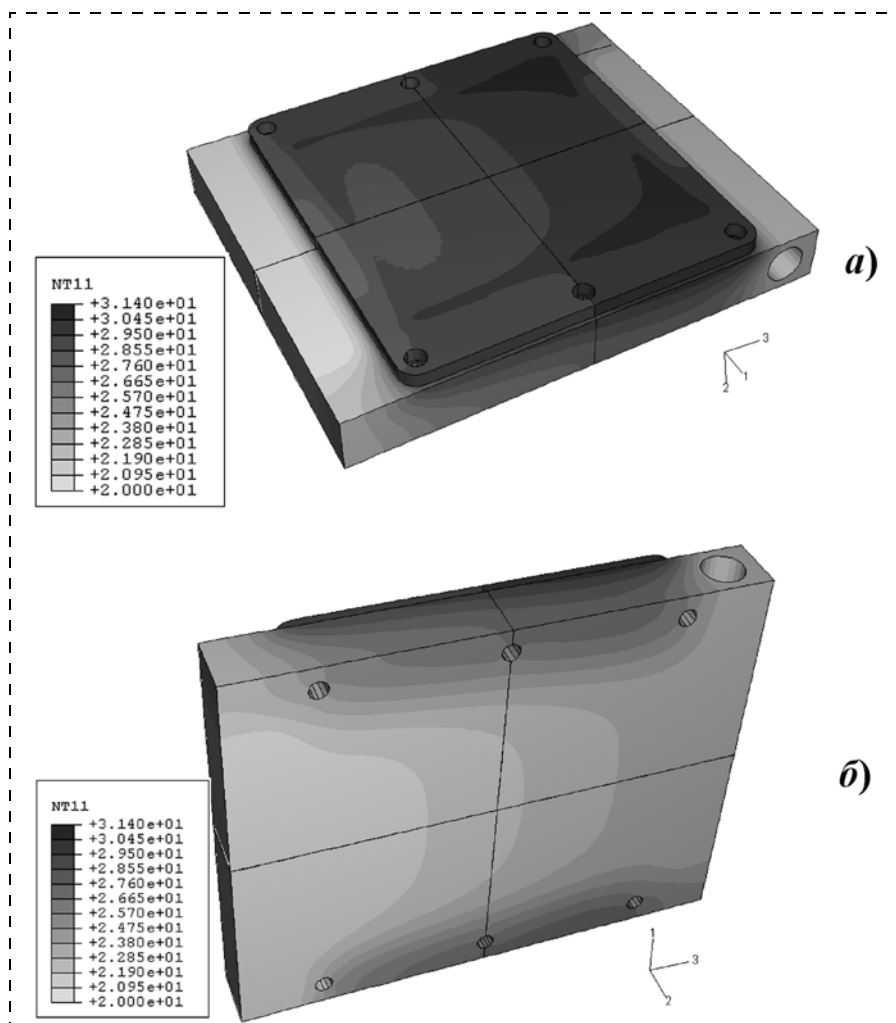


Рис. 5. Распределение температуры на внешней поверхности игольчатого радиатора (а) и корпуса (б), полученные в результате моделирования

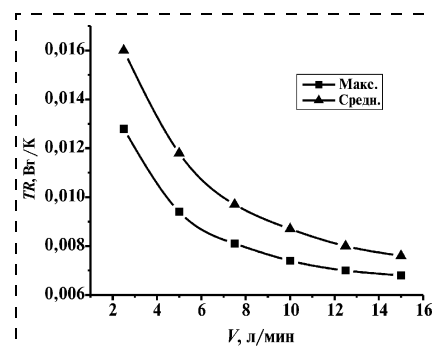


Рис. 6. Зависимость теплового сопротивления системы охлаждения TR от объемной скорости прокачки охлаждающей жидкости. Значения "Макс", получены при условии $T^* = T_{\max}$, значения "Средн." получены при условии T^* (средняя температура верхней стороны радиатора)

охлаждающей жидкости. Это, в свою очередь, обусловлено тем, что с изменением скорости движения жидкости меняется характер течения жидкости, характеристики пристенного граничного слоя и, как следствие, коэффициент теплопередачи h . Кроме того, при увеличении скорости движения жидкости снижается температура охлаждающей жидкости на выходе из охлаждающего устройства. В то же время результаты моделирования показывают, что объемная скорость оказывает особенно сильное влияние на тепловое сопротивление при относительно малых скоростях движения, а после достижения объемной скоростью значения порядка 5–6 л/мин это влияние снижается. Поэтому увеличение скорости прокачки жидкости до больших значений малоэффективно.

Существенный практический интерес представляет сравнение приведенных выше результатов, полученных для полной модели охлаждающего устройства, с результатами расчетов, проведенных для упрощенной модели, включающей только одну иглоку и соответствующую ей часть пластины (рис. 7). В качестве граничных условий для упрощенной модели мы использовали тепловой поток на верхней стороне участка пластины, а также теплообмен твердое тело — жидкость, который описывается соотношением (1) на тех участках поверхности, которые соприкасаются с охлаждающей жидкостью. Для расчета коэффициента теплопередачи h использовались соотношения (3), (4). Температура охлаждающей жидкости

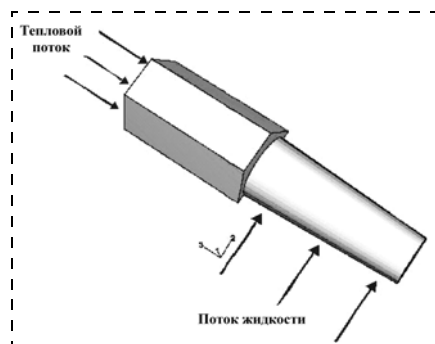


Рис. 7. Сгенерированный компьютером внешний вид упрощенной модели теплового радиатора

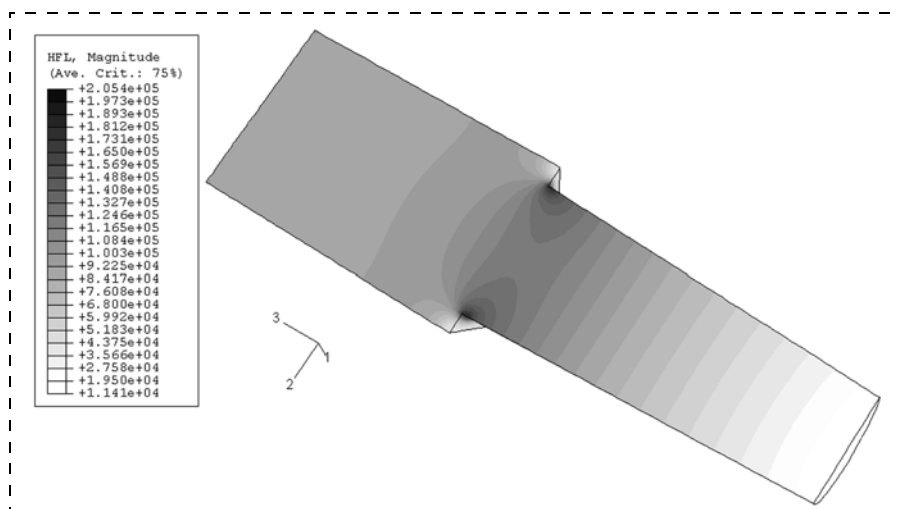


Рис. 8. Полученное в результате моделирования распределение теплового потока по сечению иглоки и пластины теплового радиатора

полагалась равной температуре жидкости в центре системы охлаждения. На остальных поверхностях упрощенной модели использовалось условие теплоизоляции, т. е. отсутствие тепловых потоков.

На рис. 8 приведено распределение тепловых потоков по сечению иглоки и пластины при стационарном режиме. Температура на верхней поверхности пластины, полученная в упрощенной модели, имеет практически такое же значение, как и при расчете полной модели и очень близка средней температуре, рассчитанной по методике, описанной ранее. Это означает, что упрощенную модель можно успешно использовать для быстрой оценки теплового сопротивления радиатора. Из распределения тепловых потоков по сечению иглы видно, что наиболее интенсивный теплообмен имеет место у основания иглы, так как здесь имеется наибольший градиент температур в пограничном слое стенка—жидкость. Нижняя часть иглоки дает существенно меньший вклад в теплообмен.

Чтобы найти оптимальное сочетание длины иглоки и ее диаметра, с помощью упрощенной модели было проведено моделирование нескольких вариантов при фиксированном диаметре иглы, но при различной ее длине. Все остальные параметры, в том числе скорость движения охлаждающей жидкости, оставались неизменными. На рис. 9 приведена зависимость разности температур $T^* - T_0$ (здесь T^* — температура

верхней поверхности пластины, T_0 — температура охлаждающей жидкости) от отношения L/D (здесь L — длина иглы, D — ее диаметр). Из приведенных результатов видно, что с ростом отношения L/D разность температур между верхней поверхностью радиатора и охлаждающей жидкостью снижается. Причем эта зависимость особенно заметна при условии, что длина и диаметр иглы имеют близкие значения. Когда длина иглы становится в 3–4 раза больше диаметра, дальнейшее влияние этого отношения на разность температур заметно снижается, т. е. дальнейшее увеличение длины иглы очень слабо влияет на эффективность радиатора. Таким образом, рассмотренная нами модель теплового радиатора с длиной иглоки 6 мм и средним диаметром 2,1 мм имеет отношение

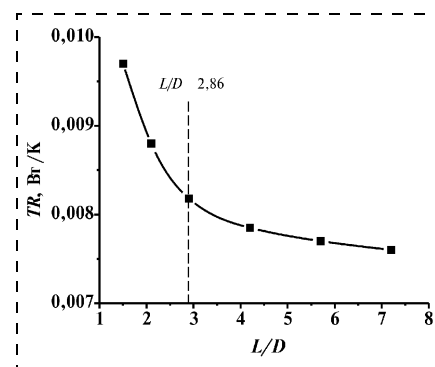


Рис. 9. Зависимость разности температур между верхней стороной радиатора и охлаждающей жидкостью от соотношения длины (L) и диаметра (D) иглоки радиатора

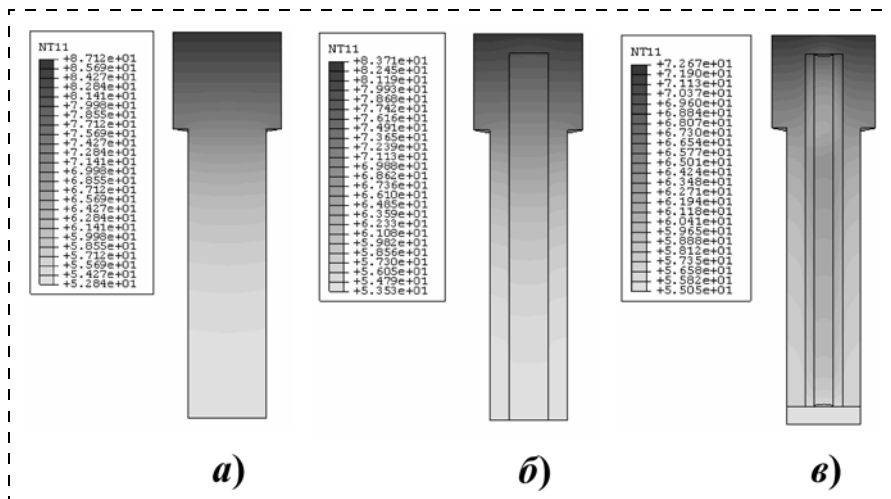


Рис. 10. Результаты моделирования распределения температуры в удлиненной иголке. Слева направо: сплошная иголка (а), иголка с медным сердечником (б), иголка с встроенной тепловой трубой (в). С помощью шкалы оттенков серого цвета показано распределение температуры в градусах Цельсия по сечению иголки. Во всех случаях тепловая нагрузка и условия охлаждения одинаковы

$L/D \approx 2,86$ что примерно соответствует оптимальному значению.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что классические устройства охлаждения, представляющие собой игольчатые и пластинчатые радиаторы, уже приблизились к пределу своих возможностей и для дальнейшего повышения эффективности охлаждения необходимо применение новых технологий, прежде всего таких, которые могут обеспечить эффективный перенос теплоты от нагреваемой поверхности радиатора к концам игловок. Для этих целей могут быть использованы миниатюрные тепловые трубы [11]. Тепловые трубы могут обеспечить эффективное перераспределение теплоты по всей длине радиаторных игловок и, таким образом, повысить общую эффективность теплообмена.

Для оценки эффективности использования тепловых труб, встроенных в иголки теплового радиатора, были рассмотрены следующие модели конструкции игловок:

- сплошная иголка увеличенной длины;
- длинная иголка с медным сердечником;
- длинная иголка со встроенной миниатюрной тепловой трубой.

Ориентировочные параметры тепловой трубы были взяты из ра-

боты [12], причем мощность, передаваемая трубкой, полагалась при расчетах равной 7 Вт, что составляет ~60 % от максимально возможной мощности для тепловой трубы такого диаметра [12]. Результаты моделирования приведены на рис. 10. Из приведенных результатов видно, что при равных тепловых нагрузках и одинаковых режимах охлаждения наличие медного сердечника снижает температуру нагреваемой поверхности радиатора с 87,12 °С у сплошной иголки до 83,71 °С у иголки с медным сердечником, а наличие встроенной в иголку миниатюрной тепловой трубы приводит к понижению температуры до 72,67 °С. Расчеты показывают, что по сравнению с рассмотренной в начале статьи современной моделью теплового радиатора радиатор со встроенными в иголки тепловыми трубками будет способен при тех же рабочих температурах рассеивать тепловую мощность, как минимум, на 70—80 % большую.

Таким образом, предложена компьютерная модель охлаждающего устройства с игольчатым радиатором и вынужденной конвекцией жидкости для мощного полупроводникового прибора с тепловой мощностью ~1 кВт, разработанная с помощью коммерческого компьютерного пакета ABAQUS. Предложенная модель может быть легко воспроизведена

опытными пользователями пакета ABAQUS или других аналогичных пакетов. Установлено, что для оценки теплового сопротивления полного радиатора можно использовать упрощенную модель, состоящую из одной центральной иголки радиатора с соответствующей частью пластины. Проведена оценка оптимального соотношения между длиной и диаметром иголки радиатора. Показано, что эффективность теплового радиатора может быть существенно (как минимум на 70—80 %) повышена, если длину игловок увеличить и при этом в каждую иголку будет встроена миниатюрная тепловая труба.

Список литературы

1. ABAQUS is a registered trademark of Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. USA, 1080 Main Street Pawtucket, RI 02860-4847.
2. Baumann H., Heinemeyer P., Staiger W., Topfer M., Unger K., Muller D. Optimized cooling systems for high-power semiconductor devices // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2001. № 2 (48). P. 298—306.
3. Tahat M. A., Babus'Haq R. F., Probert S. D. Forced steady-state convections from pin-fin arrays // Applied Energy. 1994. № 4 (48). P. 335—351.
4. Narasimhan S., Majdalani J. Characterization of compact heat sink models in natural convection // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2002. № 1 (25). P. 78—86.
5. Lin W. W., Lee D. J. Second-law analysis on a pin-fin array under cross-flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1997. № 8 (40). P. 1937—1945.
6. Maveety J. G., Jung H. H. Design of an optimal pin-fin heat sink with air impingement cooling // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2000. № 2 (27). P. 229—240.
7. Winterton R. H. S. Heat Transfer. Oxford. New York: Oxford University Press, 1997. 85 p.
8. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.
9. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление // М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
10. Antifrogen N. Clariant GmbH, Surfactants Division, Functional Fluids Marketing, D-65840 Sulzbach, Germany.
11. Faghri A. Heat Pipe Science and Technology. Washington: Taylor & Francis, 1995. 874 p.
12. Chen Y.-M., Wu S.-C., Chu C.-I. Thermal performance of sintered miniature heat pipes // Heat and Mass Transfer, 2001. № 6 (37). P. 611—616

"Умный" наноматериал сам скажет о поломке

Ученым из Политехнического Института Ренсслеера (*Rensselaer Polytechnic Institute*) удалось разработать простую технику исправления микроскопических дефектов в материалах, изготовленных из полимерных композитов, с помощью нанотрубок. Этот метод будет полезен при исправлении опасных микродефектов крыльев высокоскоростных самолетов.

Сначала ученые сделали полимерный нанокомпозит с включением электропроводящих углеродных нанотрубок. Далее происходит мониторинг электропроводимости материала: если где-то появляется микротрещина, то электропроводимость меняется. Так можно сразу же определить месторасположение и длину трещины.

Но это не самое интересное достижение профессора Нихила Кораткара (*Nikhil A. Koratkar*) из Ренсслеера. Достаточно мощным коротким электрическим импульсом, направленным в область микротрещины, можно добиться нагрева нанотрубок и частичного плавления полимерного материала, который затянет повреждение (рис. 1).

Как говорят ученые, при этом произойдет 70 %-ное восстановление прочности материала. Это достаточно неплохо для того, чтобы некоторое время использовать поврежденный материал.

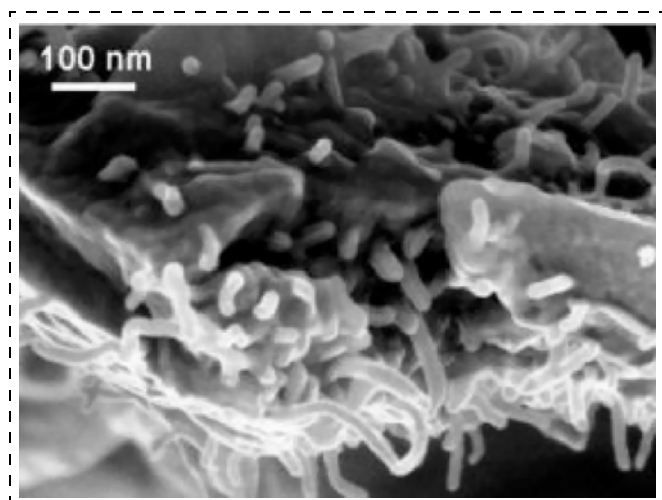


Рис. 1. Композитный восстанавливающийся наноматериал

Мониторинг повреждений в реальном времени и возможность быстрого восстановления конструкционных материалов найдут широкое применение в современных машинах и механизмах — от легкового авто до авиа- и судостроения.

Проект находился в работе более 18 месяцев. Сейчас Кораткар и его коллеги собираются совершенствовать систему мониторинга поверхности и пытаются создать цельный полимерный нанокомпозит больших размеров.

Источник: PhysOrg: Using nanotubes to detect and repair cracks in aircraft wings, other structures (<http://www.physorg.com/news110121264.html>)

Разработаны ультратонкие нанолезвия

Не думайте, что это — новость о новых нанометодах бритья, все гораздо серьезнее. Нанолезвия могут однажды помочь серьезно изменить энергетику планеты.

Исследователи из Политехнического Института Ренсслеера (*Rensselaer Polytechnic Institute*) смогли создать удивительный материал, состоящий из "лезвий" нанометровых размеров.

Нанолезвия, как их назвали ученые во главе с Го-Чин Вонгом (*Gwo-Ching Wang*), состоящие из магниевого наноматериала, могут пригодиться, как ни странно, не в бритье, а в технологии хране-

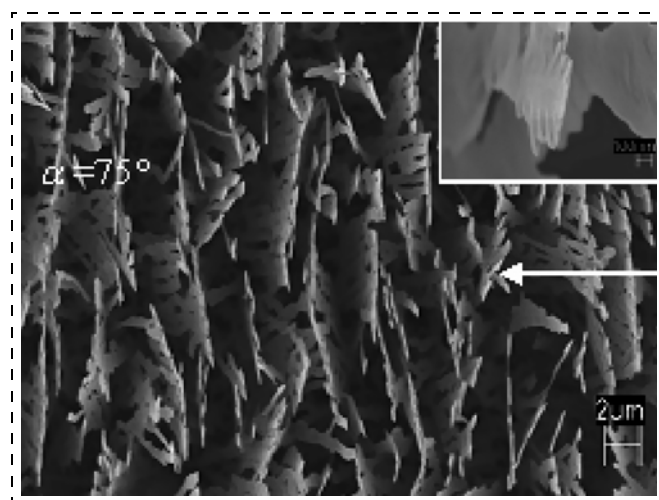


Рис. 2. Массив нанолезвий — отличный способ хранить водород

ния водорода в топливных элементах. Шероховатая поверхность полностью усеяна тончайшими миниатюрными лезвиями нанометровых размеров неправильной формы, расположенными под углом в 75° относительно плоскости подложки (рис. 2). Отдельные гребни нанолезвий имеют длину несколько сот нанометров, а толщину — около 15 нм.

При грамотном инженерно-техническом подходе такой наномассив может хранить водород. Ученые обработали поверхность нанолезвий металлическими катализаторами, что позволило эффективно связывать водород в этом массиве.

Для создания этой удивительной наноструктуры ученым пришлось модернизировать современную технологию вакуумной металлизации для того, чтобы сформировать лезвия под углом 75° к поверхности подложки.

Источник: PhysOrg: Researchers Develop Nanoblade: (<http://www.physorg.com/news109956592.html>)

Создан первый прототип графеновой RAM-памяти

В последнее время ученые много внимания уделяют графеновым материалам в надежде получить нанoeлектронные устройства на их основе. Пару лет назад был представлен первый графеновый нанотранзистор, сейчас же китайские и канадские ученые продемонстрировали логическую ячейку на основе этого наноматериала.

Графен и нанoeлектроника на его основе на самом деле имеют огромный потенциал. Особенно это касается гибридной нанoeлектроники, в которой в цепях используются квантовые точки, расположенные на графеновой поверхности. Как уже известно, такие структуры можно достаточно легко производить с помощью традиционных литографических методов.

Международной команде ученых из Университета Альберты (*University of Alberta*) и Национальной лаборатории Хейфэй (*Hefei National Laboratory*) удалось создать программируемый графеновый логический массив на основе квантовых точек, который подойдет как для создания компьютерной RAM-памяти, так и для логических цепей будущих компьютеров.

Самое интересное в графеновой нанoeлектронике состоит в том, что для работы RAM-блока не нужно соединять отдельные ключи нанопроводниками — графеновый лист представляет собой полностью функциональное, цельное устройство.

Устройство состоит из двух основных типов Z-образных графеновых нанолент (рис. 3) — соединений, которые характеризуются либо полупро-

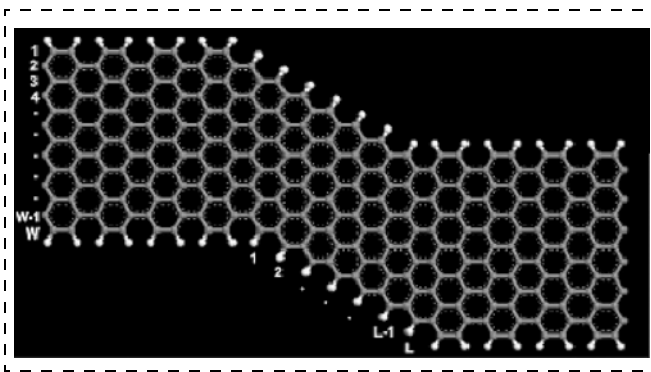


Рис. 3. Z-образная графеновая лента

водниковыми, либо металлическими свойствами. Что интересно, свойства металл—полупроводник зависят от ширины графеновой ленты, а лента-зигзаг вообще имеет только явно выраженные металлические свойства.

При этом квантовая точка формируется при изменении энергетического состояния Z-ленты.

Таким образом, при подаче внешнего напряжения на массив нанолент, разделенный между собой краевыми разделителями (они формируются на границе раздела графеновых лент разной структуры), может работать как массив RAM-памяти, поскольку наличие либо отсутствие квантовой точки на местах пересечения лент будет соответствовать логическому "0" или "1".

Как говорит один из исследователей, время доступа к отдельной графеновой ячейке памяти будет меньше, чем в стандартных CMOS-чипах. Кроме того, графеновый аналог потребляет меньше энергии.

Источник: Nanotechweb: Graphene logic gate makes its debut: (<http://nanotechweb.org/articles/news/6/9/16/1>)

Лазерный выжигатель создает трехмерные наноструктуры

Ученым из США удалось испытать на практике новый инструмент для быстрого прототипирования наноструктур, состоящих из массивов углеродных нанотрубок.

Используя специально сфокусированный лазерный луч, ученые из Университета Южной Калифорнии (*University of Southern California*) и их коллеги из Лаборатории реактивного движения при NASA (*NASA's Jet Propulsion Laboratory*) смогли выжигать отдельные "рисунки" на поверхности "нанолеса", сформированного из обыкновенных углеродных многослойных нанотрубок (рис. 4, 5).

Один из соавторов нового метода производства, ученый Стивен Кронин (*Stephen Cronin*), говорит,

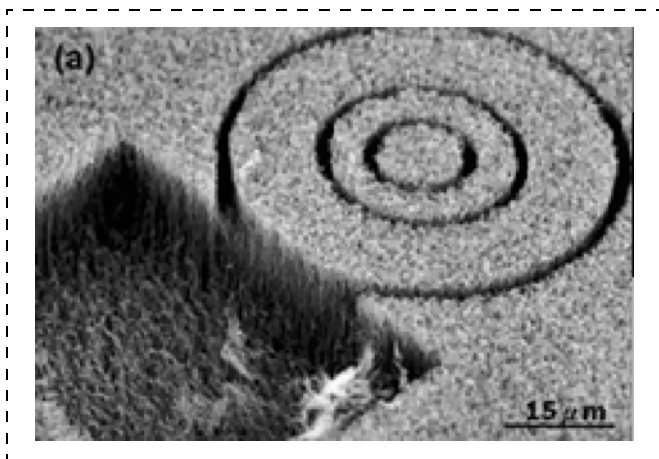


Рис. 4. Примеры полученных с помощью лазерного выжигания наноструктур на поверхности "ковра из нанотрубок"

что разработанная исследователями техника "выжигания" по нанотрубкам позволит быстро создавать новые экспериментальные типы различных наноструктур. Например, можно сконструировать основу для микрочипа-сенсора: пластину с каналами для транспорта жидкости или газа. При этом пластина будет представлять собой тот самый "нанотрубчатый лес", в котором проделают необходимые углубления.

Сама пластина-подложка формируется в специальной печи: при температуре 650 °С на ней выращивают многослойные углеродные нанотрубки. Затем с помощью довольно мощного 532-нанометрового лазера в воздушной среде ученые проводят сам процесс "выжигания" ненужных нанотрубок. Температура "выжигания" достигает 800 °С. При этом минимальная мощность лазера-"нановыжигателя" должна быть 244 мкВт. В экспериментах же исследователи не постеснялись поднять мощность лазера до 9000 мкВт.

Как говорит Кронин, "нановыжигатель" показывает превосходство перед нанолитографией, ко-

торая обычно оперирует только с двумерными структурами. Хотя странно, что ученые сравнивают эти два разных метода производства, поскольку они работают на разных поверхностях.

После процесса выжигания ученые заметили несколько белых точек диаметром от 100 до 200 нм, которые при рассмотрении их под электронным микроскопом оказались сплавленными окончаниями нанотрубок.

С помощью спектроскопии комбинационного рассеивания ученые смогли оценить глубину полученных дорожек. Она составила около 5 мкм. При этом глубину "выжигания" можно регулировать апертурой линз, установленных на микроскопе.

Потенциальные применения этой новой технологии — создание чипов для исследования ДНК, наножидкостных чипов с супергидрофобными каналами и устройств по быстрой идентификации белков.

Источник: PhysOrg: Scientists carve 3D microstructures in carbon nanotube forests (<http://www.physorg.com/news108978882.html>)

Память на основе нанонитей — универсальный заменитель flash-накопителей?

Создано первое устройство на основе нанонити, способное сохранять данные в течение длительного времени и переключаться в 1000 раз быстрее современных аналогов твердотельной памяти.

Как ни странно, но идеальными кандидатами для твердотельной памяти оказались достаточно экзотические материалы, способные переключать свое состояние от аморфного к кристаллическому. Такая "фазовая память" (*phase-change memory*) может обладать высокой плотностью хранения данных совместно с быстрым переключением материала между состояниями.

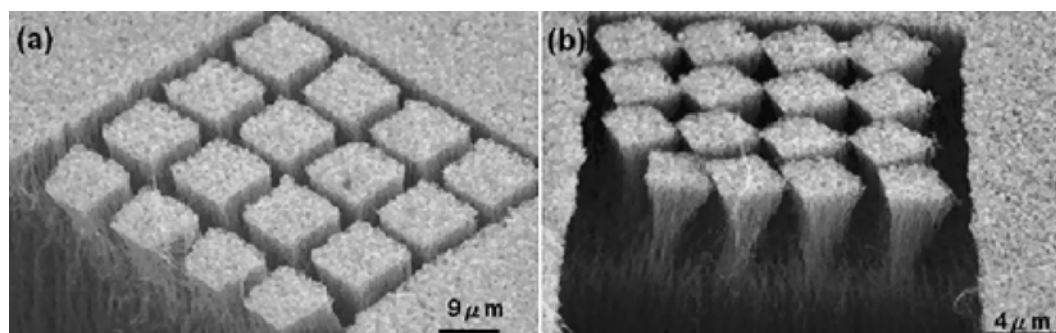


Рис. 5. Примеры полученных с помощью лазерного выжигания наноструктур на поверхности "ковра из нанотрубок"

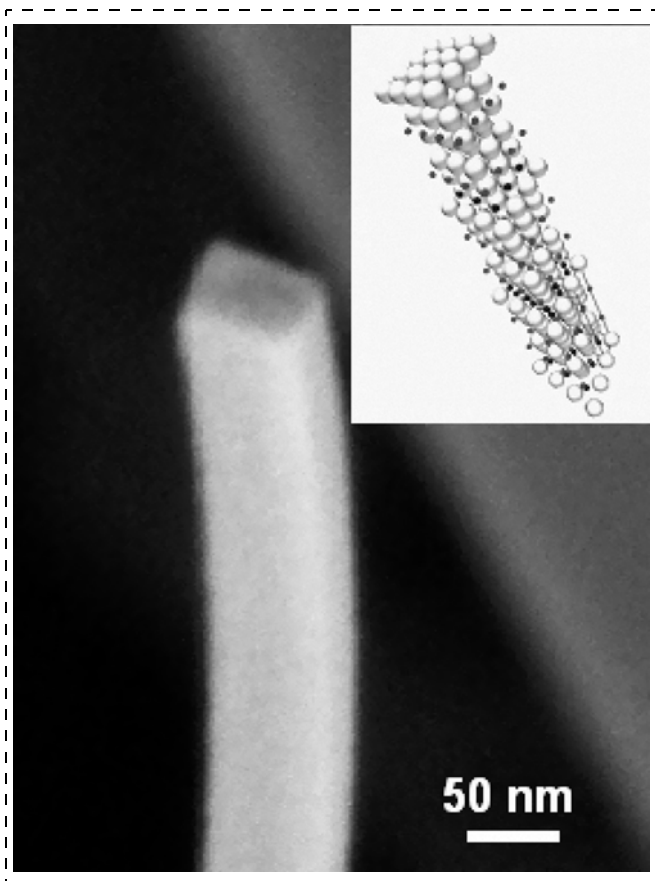


Рис. 6. Структура нанонити-ячейки

Ученые из Университета Пенсильвании (*University of Pennsylvania*) смогли создать наноячейку на основе сплава германия и теллурида сурьмы, который достаточно распространен в производстве наноэлектронных компонентов.

Ячейка нанопамати представляет собой нить длиной 10 мкм и диаметром около 30 нм.

При записи информации в нанонить-ячейку меняется ее электропроводность из-за смены фазы материала. Так, кристаллическая фаза соответствует логической "0", аморфная — "1". Из-за различной электропроводности материала в разных фазах (в кристаллической проводимость меньше, в аморфной — наоборот) ученым и удалось использовать нанонить из германиевого сплава в качестве логической ячейки (рис. 6).

Переключить фазу материала ученые смогли с помощью короткого, но достаточно мощного электрического импульса, который нагревает материал до точки плавления, из-за чего атомы материала становятся "закрепленными" в аморфном положении. После того, как подан импульс такой же продолжительности, но меньшей амплитуды, атомы возвращаются на место, формируя снова кристаллическую решетку.

Время хранения данных таким образом в нанонити — около 10 000 лет, время чтения/записи ячейки — 50 нс, потребляемая мощность — 0,7 мВт.

Как говорят исследователи, память на основе нанонитей может со временем заменить flash-память, широко используемую сегодня в мире.

Сейчас ученые работают над дальнейшей миниатюризацией нанопамати, чтобы достичь максимально возможного "предела" для подобных устройств.

Источник: Nanotechweb: Nanowires make universal memory devices (<http://nanotechweb.org/cws/article/tech/31367>)

Двухслойные углеродные нанотрубки большого диаметра

Разнообразие углеродных наноструктур пополнилось еще одним интересным объектом. Это двухслойные углеродные нанотрубки (УНТ) сверхбольшого диаметра, синтезированные недавно в *Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York* (США).

Вертикально упорядоченные пленки таких УНТ были синтезированы методом химического осаждения паров (CVD). Катализатором служил слой железа толщиной 1—5 нм, напыленный с помощью электронного пучка на кремниевую подложку, покрытую буферным слоем Al. В качестве углеродсодержащего газа выступал этилен, подмешиваемый к потоку Ag/H_2 состава 85:15.

В некоторых экспериментах поток Ag/H_2 перед смешением с этиленом пропускали через сосуд с водой при комнатной температуре. Синтез УНТ проводили при температуре 700—800 °С в течение 5—1800 с.

Полученные образцы УНТ изучали с помощью сканирующего и просвечивающего электронных микроскопов, а также с помощью спектрометра комбинационного рассеяния. Наблюдения показали, что в результате синтеза продолжительностью 30 мин образуется вертикально упорядоченный массив двухслойных УНТ высотой около 1 мм. При этом максимальное содержание двухслойных УНТ в массиве достигается при толщине каталитического слоя, равной 1,5 нм. Нанотрубки отличаются высокой степенью чистоты и практически не содержат ни частиц железа, ни частиц аморфного углерода в виде примесей.

Средний диаметр нанотрубок составляет 7,9 нм, что более чем вдвое превышает его максимальное значение, наблюдавшееся другими авторами. Важной особенностью полученных массивов двухслойных УНТ является аномально низкая плотность этого материала, составляющая,

согласно измерениям, $0,015 \pm 0,002 \text{ г/см}^3$. Это примерно вдвое ниже значения, измеренных ранее для массивов однослойных и двухслойных УНТ, что позволяет рассматривать данный объект как наиболее легкий из синтетических материалов. Причина столь низкой плотности массива состоит в значительном среднем расстоянии между нанотрубками, которое составляет, согласно оценкам, 50 нм и соответствует поверхностной плотности нанотрубок в массиве около 400 мкм^{-2} .

Наблюдения указывают также на значительные отклонения двухслойных УНТ от формы идеального цилиндра, присущей однослойным нанотрубкам или двухслойным УНТ малого диаметра. Нанотрубки по большей части изогнуты, смяты и содержат немало структурных дефектов.

Результаты исследований указывают на высокую гидрофобность полученных пленок УНТ. Угол смачивания зависит от толщины каталитического слоя и изменяется в диапазоне от 137 до 100° . Отмечается, что гидрофобные пленки двухслойных УНТ могут найти применение в некоторых областях медицины.

Источник: L. Ci, R. Vajtai, P. M. Ajayan J. Phys. Chem. C. 111, 9077 (2007).

Партия в бильярд... на листе графена

Игра в бильярд вряд ли возможна на столе, меньше чем этот: физики из университета Калифорнии показали, что лист графена может действовать как бильярдный стол атомного масштаба с электрическими зарядами вместо бильярдных шаров.

Наблюдение показывает, что графен может служить превосходным электронным материалом (типа кремния) и использоваться для новых видов транзисторов, основанных на квантовой физике, поскольку электроны не сталкиваются ни с какими препятствиями и перемещаются "свободно" вдоль листа углерода, перенося электрический заряд с чрезвычайно низким сопротивлением.

Результаты опубликованы в прошлом номере Science. Группа исследователей во главе с Чанг

Нинг (Джини) Ло (*Chun Ning (Jeanie) Lau*) нашла, что электроны в графене перемещаются свободно и отражаются только от границ листа. При этом они демонстрируют свойства, которые напоминают и частицы, и волны. Причем, отражаясь от одной из границ листа графена, исходные и отраженные "части" электрона могут столкнуться друг с другом, как рябь в водоеме может столкнуться с рябью, отраженной от берега.

Лаборатория Ло обнаружила "интерференцию электронов", измеряя электрическую проводимость графена при чрезвычайно низкой ($0,26 \text{ К}$) температуре. При таких низких температурах квантовые свойства электронов проще изучать.

Исследователи обнаружили, что электроны в графене могут демонстрировать волновые свойства, которые могут привести к интересным применениям (например, баллистические транзисторы, которые являются новым типом транзисторов), а также созданию резонаторов для электронов.

В своих экспериментах Ло с коллегами сначала сняли с графита отдельный лист, затем приложили нанoeлектроды к нему, поместив охлаждающее устройство, и провели измерения электрической проводимости.

Графен был изолирован экспериментально меньше трех лет назад. Он является двумерной соотвеченной решеткой углеродных атомов и структурно связан с углеродными нанотрубками и фуллеренами.

С научной точки зрения, графен стал модельной системой для физики твердого тела. Графен позволяет проводить настольные экспериментальные тесты множества явлений в физике, включая квантовую механику и теорию относительности. Имея исключительные свойства, например высокие теплопроводность и электропроводность, графен идеально подходит на роль компонентов для полупроводниковых схем и компьютеров. Толщиной всего в один атом он может использоваться при создании ультраминиатюрных электронных устройств.

Источник: Sheet of carbon atoms acts like a billiard table, physicists find (http://www.eurekalert.org/pub_releases/2007-09/uoc-soc091407.php)

CONTENTS

Verner V. D., Ivanov A. A., Kolomenskaya N. G., Luchinin V. V., Maljtcev P. P., Popova I. V., Saurov A. N., Teletc V. A. <i>The Produces of Microsystems Techniques — Terms and Definitions, Classification and Indication of Types</i>	2
Luchinin V. V. <i>Nanoindustry and "Human Capital"</i>	6
Ageev O. A., Konoplev B. G., Polyakov V. V., Svetlichniy A. M., Smirnov V. A. <i>Investigation of Photon Stimulated Probe Nanolithography Regimes by Local Anodic Oxidation of Titanium Film</i>	14
Kozlov A. G. <i>Thermal Microsensors: Design Features</i>	16
Yashin K. D., Osipovich V. S., Bozhko T. G. <i>Developing of Mems</i>	28
Galoushkov A. I., Saurov A. N., Pogalov A. I. <i>Modelling, Dynamic and Strength the Analysis of Inertial Sensor Nanelements</i>	34
Gridnev S. A., Gorshkov A. G., Sitnikov A. V., Samalyuk N. V. <i>Effect of Electric Field on the Crystallization Process of Thin Film Amorphous Metal-Ferroelectric Nanocomposites</i>	38
Marakhtanov M. K., Dukhopelnikov D. V., Mei Xian Xiu. <i>The Dispersing Characteristics of the Nanosize Metal Films in a Visible Radiation</i>	42
Bryukhova Yu. V., Zaitsev N. A. <i>The Analysis of Mismatch of Physicotechnical Parameters of Semiconductor Devices</i>	48
Ahmetov D. G., Kostsov E. G., Sokolov A. A. <i>Microelectromechanical Electrostatic Highpower Injectors of Liquid Microjets</i>	53
Mokrov E. A., Belozubov E. M., Belozubova N. E. <i>On Termal Electromotive Force Compensation in Thin-Film MEMS for Strain Sensors at Unstable Temperature Conditions</i>	61
Vekshin M. M., Yacovenko N. A. <i>Characteristics of Plasmon-Resonance Biosensors on Submicron Diffraction Gratings</i>	65
Khorunzhii I. A., Domanevsky D. S., Bobuchenko D. S. <i>Computer Optimization of Heat Sink Parameters for Cooling of Powerful Semiconductor Device</i>	70

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)

The journal bought since november 1999.

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

ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(495) 269-5510.

E-mail: nmst@zknet.ru; http://www.microsystems.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала (495) 269-5510. E-mail: nmst@zknet.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор Волкова Е. Г.

Сдано в набор 20.11.2007. Подписано в печать 00.12.2007. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 12,17. Заказ 24. Цена договорная

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15